

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (navazující magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



Bc. Matouš Karvánek

**VYUŽITÍ DAT SENTINEL-1 PRO TVORBU
DIGITÁLNÍHO MODELU TERÉNU METODOU
RADAROVÉ INTERFEROMETRIE**

**USING SENTINEL-1 DATA FOR CREATING A DIGITAL TERRAIN
MODEL BY MEANS OF RADAR INTERFEROMETRY**

Diplomová práce

Praha 2016

Vedoucí diplomové práce: Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.

Vysoká škola: Univerzita Karlova v Praze

Fakulta: Přírodovědecká

Katedra: Aplikované geoinformatiky a kartografie

Školní rok: 2015/2016

Zadání diplomové práce

pro Matouše Karvánka

obor Kartografie a geoinformatika

Název tématu: Využití dat Sentinel-1 pro tvorbu digitálního modelu terénu metodou radarové interferometrie

Zásady pro vypracování

Data družice Sentinel-1 jsou svým způsobem milníkem v pořizování a zpracování radarových dat, a to svým časovým a prostorovým rozlišením. Cílem práce je:

osvojit si postup práce s daty Sentinel-1 a s novým software Sentinel-1 Toolbox pro aplikaci radarové interferometrie,

vyhotovit interefeogram a digitální model povrchu (DMP) pro zájmová území s odlišnou členitostí terénu a s odlišným krajinným pokryvem,

zhodnotit přesnost vytvořeného DMP v zájmových územích porovnáním s výškovým modelem DMP 1G.

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: cca 60 stran

Seznam odborné literatury:

CROSETTO, M. (2002): Calibration and validation of SAR interferometry for DEM generation, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 57, s. 213 – 227

FERRETTI, A. et al. (2007): InSAR Principles, ESA publication

GOLDSTEIN, R., M., WERNER CH., L. (1998): Radar interferogram filtering for geophysical applications, Geophysical research letters, 25, s. 4035 – 4038.

HÖHLE, J., HÖHLE, M. (2009): Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods, ISPRS Journal of Photogrammetry and remote sensing, 64, s. 398 – 406.

NIKOLAKOPOULOS, K., KYRIOU, A. (2015): Preliminary results of using Sentinel-1 SAR data for DSM generation, European journal of geography, 6, s. 52 – 68.

TORRES, R. et al. (2012): GMES Sentinel – 1 missions, Remote sensing of environment, 120, s. 9 – 24.

ZHENGXIAO, L., BETHEL, J. (2008): Image coregistration in SAR interferometry, The international archives for photogrammetry, remote sensing and spatial information science, 37, 6 s.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Dr. Antonios Mouratidis

Datum zadání diplomové práce: 30. 6. 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 5. 8. 2016

Platnost tohoto zadání je po dobu jednoho akademického roku.

.....

Vedoucí diplomové práce

.....

Garant oboru

V Praze dne 30. 6. 2015

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením školitelky Ing. Markéty Potůčkové, Ph.D., a že jsem uvedl a řádně citoval všechny použité prameny. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

Jsem si vědom toho, že případné použití výsledků získaných v této práci mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity.

Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Praze dne 5. srpna 2016

.....

Matouš Karvánek

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí mé práce Ing. Markétě Potůčkové, Ph.D. za věnovaný čas, cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat Zeměměřičskému ústavu za poskytnutí dat potřebných k vypracování této diplomové práce. V neposlední řadě děkuji rodině za podporu v průběhu celého studia.

Využití dat Sentinel-1 pro radarovou interferometrii

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na tvorbu digitálního modelu povrchu (DMP) s využitím radarové interferometrie (InSAR) z dat Sentinel-1 ve vybraných lokalitách v České republice. V teoretické části je popsána technika radarové interferometrie, data Sentinel-1, jejich parametry a možnosti využití. Dále jsou popsány testované lokality a využitá data. Praktická část se zaměřuje na vytvoření metodického postupu tvorby digitálního modelu povrchu a jeho extrahování ve třech testovaných lokalitách. Tyto lokality se odlišují geomorfologickým členěním a také prvky krajinného pokryvu (*land cover*). V závěru této části je provedeno porovnání vytvořeného modelu pomocí statistických metod se vztažným DMP 1G. Na konci práce jsou výsledky zhodnoceny a diskutovány.

Klíčová slova: InSAR, Sentinel-1, SAR, DMP

Using of Sentinel-1 data for radar interferometry

Abstract

The diploma thesis deals with extraction of a digital surface model (DSM) using synthetic aperture radar interferometry (InSAR) and Sentinel-1 data in selected locations of the Czech Republic. The InSAR technique, the Sentinel-1 data, their parameters and possibilities of their usage are described in the theoretical part of the thesis. The specification of the model areas and used data follows. The practical part is focused on creating a methodology of deriving a digital surface model and its extracting in the three tested locations. These locations differ from each other in their geomorphological features and land cover. At the end of this part the comparison of the extracted model with the reference model DMP 1G using statistical methods is carried out. At the end of this thesis the results are evaluated and discussed.

Key words: InSAR, Sentinel-1, SAR, DSM

Obsah

Přehled použitých zkratk	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	10
1 Úvod	12
2 Radarová interferometrie s daty Sentinel-1	14
2.1 Základní charakteristika SAR.....	14
2.2 Vliv atmosféry.....	16
2.3 Polarizace	16
2.4 Tvorba DMR pomocí InSAR	17
2.4.1 Koregistrace dat.....	17
2.4.2 Filtrace v příčném směru	18
2.4.3 Vytvoření Interferogramu	19
2.4.4 Odhad koherence.....	20
2.4.5 Odstranění referenční fáze	21
2.4.6 Filtrace fázové složky.....	21
2.4.7 Rozbalení fáze.....	21
2.4.8 Transformace fáze na výšku	22
2.4.9 Terénní korekce	23
2.5 Data Sentinel-1.....	24
2.5.1 Základní charakteristika Sentinel-1.....	24
2.5.2 Úrovně, produkty a operační módy Sentinel-1	26
2.5.3 Aplikace dat Sentinel-1	28
2.5.4 Poskytování dat a jejich předzpracování.....	29
3 Zájmová území a data	31
3.1 Zájmová území	31
3.2 Data.....	33
3.2.1 Výběr dat Sentinel-1.....	33
3.2.2 DMP 1G	33

3.3	SNAP 3.0.....	34
4	Metodika zpracování.....	35
4.1	Postup tvorby DMP	35
4.1.1	Načtení dat (Data read).....	36
4.1.2	Koregistrace dat (S1 TOPS Coregistration)	36
4.1.3	Filtrace v příčném směru (Range filter).....	37
4.1.4	Vytvoření interferogramu (Interferogram formation).....	38
4.1.5	Odhad koherence (Coherence estimation)	38
4.1.6	S1 TOPSAR – deburst.....	38
4.1.7	Odstranění referenční fáze (Interferogram flattening)	39
4.1.8	Filtrace fáze (Phase filtering)	39
4.1.9	Rozbalení fáze (Phase unwrapping).....	39
4.1.10	Transformace fáze na výšku (DEM generation)	40
4.1.11	Terénní korekce	40
4.2	Transformace mezi výškovými systémy	40
4.2.1	Výškový systém Bpv.....	40
4.2.2	Výškový systém ETRS89	41
4.2.3	Transformace mezi ETRS89 a Bpv	41
4.3	Hodnocení přesnosti statistickými metodami	41
5	Výsledky a hodnocení	43
5.1	Výběr polarizace.....	43
5.2	Hodnocení koherence	43
5.3	Hodnocení extrahovaných DMP.....	50
6	Diskuze.....	54
7	Závěr	56
	Použité zdroje.....	57
	Seznam příloh.....	61

Přehled použitých zkratk

Bpv – **B**alt **p**o vyrovnání

ERS – **E**uropean **R**emote **S**ensing **S**atelite

ESA – **E**uropean **S**pace **A**gency

ETRS89 – **E**uropean **T**errestrial **S**ystem **1989**

DEM – **D**igital **E**levation **M**odel

DMP – **D**igitální **M**odel **P**ovrchu

DMR – **D**igitální **M**odel **R**eliéfu

DSM – **D**igital **S**urface **M**odel

FFT – **F**ast **F**ourier **T**ransformation

GCP – **G**round **C**ontrol **P**oint

GMES – **G**lobal **M**onitoring for **E**nvironment and **S**ecurity

GRS80 – **G**eodetic **R**eference **S**ystem **1980**

HLOP – **H**igh **L**evel **O**peration **P**lan

InSAR – **I**nterferometric **S**ynthetic **A**perture **R**adar

NASA – **N**ational **A**eronautics and **S**pace **A**dministration

NGA – **N**ational **G**eospatial-**I**ntelligence **A**gency

RMSE – **R**oot-**M**ean-**S**quare **E**rror

ROI – **R**egion **O**f **I**nterest

SAR – **S**ynthetic **A**perture **R**adar

SLC – **S**ingle **L**ook **C**omplex

SM 5 – **S**tátní **M**apa v měřítku 1:5 000

SNR – **S**ignal to **N**oise **R**atio

UELN – **U**nited **E**uropean **L**evelling **N**et

UPLN – **U**nited **P**recise **L**evelling **N**etwork

WGS84 – **W**orld **G**eodetic **S**ystem **1984**

Seznam obrázků

Obr. 1 Koncept fázového posunu	14
Obr. 2 Geometrie SAR	15
Obr. 3 Rozdílné zkosení drah oběhu.....	18
Obr. 4 Rozbalená fáze a původní zabalená fáze	22
Obr. 5 Topografické zkreslení v SAR snímku.....	23
Obr. 6 Snímání povrchu pomocí pásma C.....	25
Obr. 7 Operační módy Sentinel-1.....	27
Obr. 8 Poskytované typy polarizace (cyklus 82)	28
Obr. 9 S1-TOPS Deburst.....	30
Obr. 10 Přehledová mapa zájmových území.....	31
Obr. 11 Ortofoto zájmových území: (a) BRAN_00, (b) PRAH_70, (c) ZACL_81	32
Obr. 12 Postup zpracování v software SNAP 3.0	36
Obr. 13 Histogram koherence BRAN_00.....	47
Obr. 14 Histogram koherence PRAH_70	47
Obr. 15 Histogram koherence ZACL_81	48

Seznam tabulek

Tab. 1 Typy poskytování polarizace	16
Tab. 2 Pásma SAR a jejich vlnové délky	25
Tab. 3 Operační módy Sentinel-1.....	27
Tab. 4 Procentuální podíl krajinných pokryvů dle Corine Land Cover (Cenia 2012) s úpravou dle ortofota ČÚZK (ČÚZK 2016b)	32
Tab. 5 Topografické charakteristiky jednotlivých území	32
Tab. 6 Rozdíl mezi výškovými systémy ETRS89 a Bpv.....	41
Tab. 7 Srovnání koherence jednotlivých polarizací	43
Tab. 8 Průměrná koherence u vyhotovených interferogramů	44
Tab. 9 Směrodatná odchylka koherence u vyhotovených interferogramů	44
Tab. 10 Podíl koherence BRAN_00.....	46
Tab. 11 Podíl koherence PRAH_70	46
Tab. 12 Podíl koherence ZACL_81	46
Tab. 13 Hodnoty koherence v závislosti na krajinném pokryvu	49
Tab. 14 Směrodatná odchylka koherence u jednotlivých typů krajinného pokryvu ..	49
Tab. 15 Hodnocení výšek DMP v lokalitě BRAN_00	50

Tab. 16 Hodnocení výškových chyb v lokalitě BRAN_00	51
Tab. 17 Hodnocení výšek DMP v lokalitě PRAH_70	51
Tab. 18 Hodnocení výškových chyb v lokalitě PRAH_70	51
Tab. 19 Hodnocení výšek DMP v lokalitě ZACL_8	52
Tab. 20 Hodnocení výškových chyb v lokalitě ZACL_81	52

1 Úvod

Radarová interferometrie (InSAR) je obrazová technika užívaná v dálkovém průzkumu Země (DPZ) a geodézii, při které jsou využívány a zpracovávány dva (nebo více) snímky pořízené radarem se syntetickou aperturou (SAR). Původně vznikla za účelem získání informace o topografii a výškových digitálních modelů daného území. Vyvinula se ale také do nástroje sloužícího k měření prostorových posunů terénu s milimetrovou přesností. Toho se dá využít při detekci a monitoringu deformací po zemětřeseních nebo vulkanických projevech, či k detekci pohybu ledovců nebo rychlosti zdvihů a poklesů půd. Další využití nachází radarová interferometrie v půdním mapování, klasifikaci krajinného pokryvu nebo měření biomasy (Rott 2009).

Digitální model povrchu (DMP) je model povrchu Země se všemi objekty, které se na ní nachází. Vzniká pomocí radarového měření v dálkovém průzkumu Země, leteckého laserového skenování (LLS) nebo obrazové korelace ve fotogrammetrii. Nachází využití ve velkém množství aplikací, např. hydrologických a geomorfologických modelování, projektování infrastruktury nebo budov, vizualizaci krajiny, pohledových analýz, leteckých simulací nebo šíření signálu.

Data Sentinel-1 produkovaná Evropskou kosmickou agenturou ESA jsou milníkem v pořizování a zpracování radarových dat díky svým hustým časovým řadám (temporálnímu rozlišení), velikosti snímaných scén, prostorovému rozlišení a hlavně všeobecně volné dostupnosti včetně zpracovatelského softwaru.

Hlavním cílem práce je tvorba DMP z dat Sentinel-1 a ověření jeho přesnosti v závislosti na topografii a typu krajinného pokryvu. V rámci toho je úkolem osvojení si principů radarové interferometrie, zpracování dat Sentinel-1 a používání zpracovatelského softwaru. To obnáší zjištění možností práce s těmito daty, hardwarové a softwarové náročnosti a nastavení ideálních vstupních parametrů. Vytvořený DMP je testován ve třech lokalitách, které se odlišují z hlediska výškové členitosti a krajinného pokryvu. Výhodou práce s územím nacházejícím se v České republice je dostupnost vysoce kvalitního DMP 1G z dat LLS. Ten v této práci slouží k ověření přesnosti DMP z radarových dat pomocí statistických metod.

Úvodní teoretická část diplomové práce seznamuje se základními charakteristikami obrazových dat pořízených technologií SAR, definuje techniku radarové interferometrie a použítá data Sentinel-1. Podrobně jsou komentovány všechny kroky vedoucí k vygenerování DMP. Dále jsou uvedeny některé parametry a vlivy, na nichž závisí kvalita výsledku. V následující kapitole je okomentován výběr testovaných území a zpracovávaných dat. V metodické části je popsán vlastní postup

práce včetně použitých parametrů a jejich vysvětlení. Komentován je proces generování DMP, terénní korekce, převod mezi výškovými systémy a statistické srovnání vygenerovaného modelu s modelem DMP 1G.

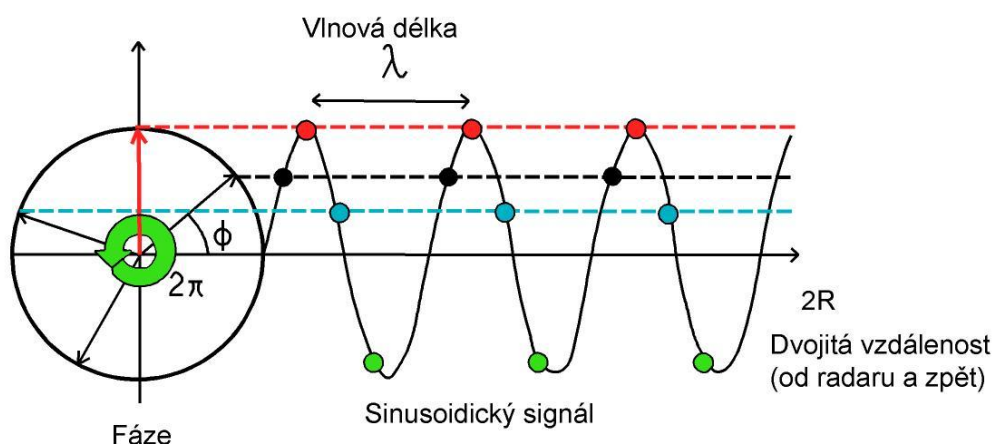
V závěrečné části jsou uvedeny, zhodnoceny a diskutovány dosažené výsledky. Zároveň jsou uvedeny návrhy a teoretické možnosti na vylepšení postupu a případného navázání na tuto práci.

2 Radarová interferometrie s daty Sentinel-1

2.1 Základní charakteristika SAR

Radar (Radio detecting and ranging) byl zkonstruován jako zařízení určené ke zjišťování polohy a přítomnosti objektů. Patří mezi tzv. aktivní prostředky DPZ, kdy systém vysílá krátký a intenzivní mikrovlnný signál určitým směrem a přijímá signál navracený odrazem od snímaných předmětů. Radarový systém může být umístěn na zemském povrchu, letadle nebo vesmírné družici. U družic je využíván tzv. SAR (syntetizující radar). Systém může produkovat obrazové záznamy – radarové snímky (Dobrovolný 1998).

SAR snímek je znázorněn pravidelnou mřížkou komplexních hodnot nesoucích dvě složky, amplitudovou a fázovou (dále označován jako SLC, viz kap. 2.3.3). Amplitudová složka udává informaci o intenzitě odraženého záření ze snímaného povrchu. Pro radarovou interferometrii je ovšem podstatná fázová složka, která udává informaci o fázovém posunu odraženého záření (Obr. 1). Plošky v rozdílných vzdálenostech od radaru (v šikmé vzdálenosti) se projeví různým zpožděním mezi vyslaným a přijatým zářením. Díky téměř sinusoidické povaze přijatého signálu, je toto zpoždění τ ekvivalentní fázovému posunu mezi odraženým a přijatým signálem. Označuje se jako Φ a nabývá hodnot v intervalu $\langle 0, 2\pi \rangle$. Skutečný fázový posun se zjistí dělením dvěma z důvodu cesty signálu k cíli a znovu zpět k radaru (Ferretti et al. 2007c).

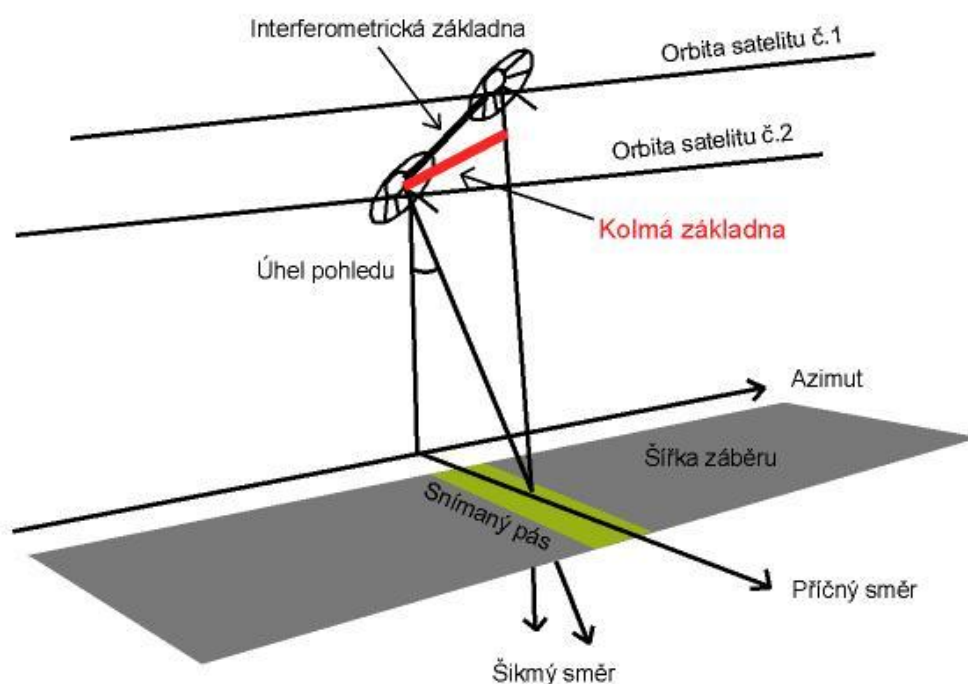


Obr. 1 Koncept fázového posunu

Zdroj: Ferretti et al. 2007a

Vzdálenost mezi družicí a povrchem ve směru pohledu se nazývá vzdálenost v šikmém směru, resp. šikmá vzdálenost (*slant range*, také *line of sight* – LOS). Kolmý průmět této vzdálenosti je vzdálenost ve směru kolmém na směr letu, nebo horizontální vzdálenost (*ground range*) (Ferretti et al. 2007b).

Satelit SAR může snímat stejnou plochu z různých úhlů. Toho je docíleno buď pomocí dvou radarů instalovaných vedle sebe na stejné platformě (snímají najednou) nebo pořízením snímků v různých časových intervalech stejným satelitem (či jeho dvojčetem v případě Sentinel-1) z následující orbity. Vzdálenost mezi dvěma satelity v okamžiku snímkování a v rovině kolmé k oběžné dráze referenční družice se nazývá interferometrická základna (*interferometric baseline*). Ta lze rozložit na dvě složky. První složkou je kolmá základna (*perpendicular baseline*), která je kolmá k radarovému paprsku. Druhou je rovnoběžná základna (*parallel baseline*), která je rovnoběžná s radarovým paprskem. Čas, který uběhne mezi pořízením prvního a druhého snímku, určuje časová základna (*temporal baseline*) (Rott 2009). Geometrie SAR je znázorněna v Obr. 2.



Obr. 2 Geometrie SAR

Zdroj: Ferretti et al. 2007a

Optimální velikost kolmé základny se nachází v rozmezí 100 – 300 m. Základny delší než 500 m mají za následek problémy s rozbalením fáze a generováním interferometrických proužků, pokud není k dispozici jiný přesný DEM nebo pokud se nejedná o plochý, rovinnatý terén. Příliš krátké základny na druhé straně ztrácejí senzitivitu k výpočtům přesné topografie (Ferretti et al. 2007a).

Od hodnot časové základny se odvíjí výsledný produkt. Pokud chceme získat informace o změnách terénu v čase, potřebujeme časovou základnu dlouhou, jako je naše zájmové časové období. Tento typ interferometrie se nazývá diferenční. Naopak k tvorbě přesného DEM a topografickému mapování je potřeba získat snímky s časovou základnou co nejkratší, což vyplývá z předpokladu minimálního počtu změn v krátkém časovém období (Rott 2009).

2.2 Vliv atmosféry

Radarové snímky jsou při z důvodů odlišných časových a prostorových pořízeních rozdílně ovlivněny atmosférou. Rozdíly se projevují jako atmosférické artefakty, které ovlivňují interferometrickou fázi a tím výsledky měření topografie nebo deformací. Největší vliv mají vodní páry. Změna relativní vlhkosti v troposféře o 20% může mít za následek chyby okolo 10 cm v diferenční interferometrii a kolem 100 m při odvozování topografických produktů. Menší vliv mají změny hodnot teploty a tlaku vzduchu (Zebker 1996).

Pro topografické aplikace je doporučeno maximalizovat interferometrickou základnu, pro měření deformací povrchu je vhodné využít více pozorování a průměrovat obdržené výsledky. Obecně platí, že delší vlnové délky jsou atmosférou ovlivňovány méně než kratší vlnové délky (Zebker 1996). Pásma SAR a vlnové délky jsou zachyceny v Tab. 2.

2.3 Polarizace

Polarizace je důležitou součástí radarové vlny. Skládá se ze dvou vektorových složek. Jsou jimi vektor elektrické složky a složka magnetického pole, které jsou kolmé jak vzájemně na sebe, tak také na směr šíření vlny. V důsledku vzájemné kolmosti obou složek, se používá k popisu polarizace pouze orientace vektoru intenzity elektrického pole (Verma 2012).

Možnosti poskytování typů polarizace jsou ukázány v Tab. 1.

Jednoduchá polarizace	HH; VV; HV nebo VH
Duální polarizace	HH + HV; VV + VH nebo HH + VV
Alternativní polarizace	HH + HV alternováno VV + VH
Plná polarizace	HH + VV + HV + VH

Tab. 1 Typy poskytování polarizace

Popis polarizace signálu je definován pomocí vysílané a přijímané vlny. Dvojice písmen značí typ vlny, kdy vysílaná vlna je na prvním místě a přijímaná vlna na druhém. H značí horizontální směr vlny k zemskému povrchu a V značí vertikální směr vlny k zemskému povrchu (Verma 2012).

Polarizační vlna se při interakci s různými typy povrchu různým způsobem modifikuje. Modifikace je ovlivněna geometrickou strukturou, tvarem, odrazivostí,

orientací, ale také vlhkostí nebo drsností povrchu. Díky tomu se různé prvky povrchu jeví v různých polarizačních kanálech odlišně a je možné těchto informací využít při klasifikacích krajinného pokryvu (Ollegini 2008).

2.4 Tvorba DMR pomocí InSAR

Existuje několik technik odvození DMP, jako je např. LLS nebo stereofotogrammetrie. Jednou z nich je také InSAR. Výsledky této metody jsou velmi citlivé a závislé na množství vstupních parametrů, vlastnostech radaru a časové dekorelaci (Wegmüller et al. 2009). Podle Lanariho et al. (1996) závisí kvalita výstupů na délce kolmé základny (ta nesmí překročit kritickou hodnotu), Dopplerově centroidu (snímky musí mít překryv spektra pod stejným úhlem) a časové základně (změny terénu v času).

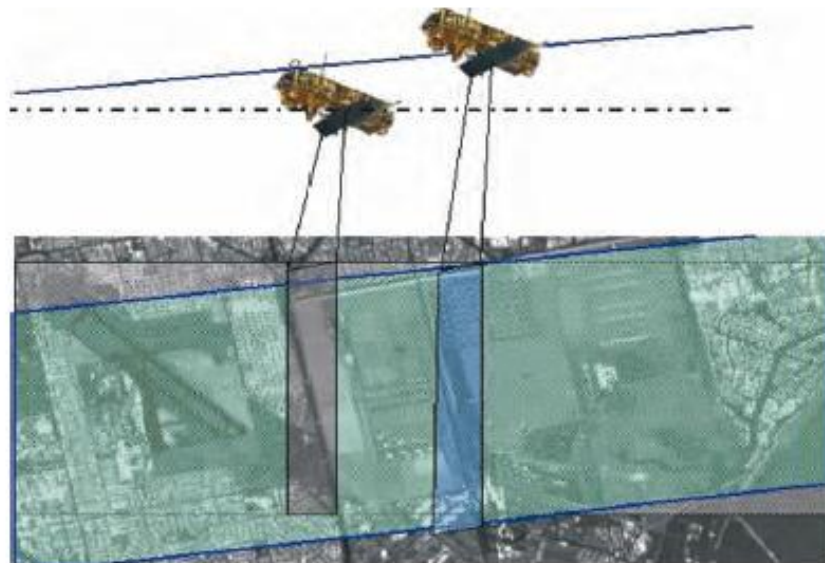
Výšková přesnost odvozeného DMP závisí na vlnové délce a na koherenci. Pro oblasti se stejnou koherencí platí, že výšky odvozené z pásma X jsou dvakrát přesnější než výšky odvozené z pásma C a osmkrát přesnější než výšky odvozené z pásma L (Lanari et al. 1996).

K odvození DMP pomocí InSAR je potřeba alespoň dvou SAR snímků stejného území, získaných z velmi podobného místa měření (pod podobným úhlem). Podle Crosetta (2002) se základní proces generování DMP skládá z několika kroků:

- Koregistrace snímků, převzorkování, interpolace
- Filtrace v příčném, azimutálním směru
- Výpočet interferogramu
- Odhad koherence
- Odstranění referenční fáze
- Filtrování fáze
- Rozbalení fáze
- Transformace fáze na výšku
- Terénní korekce

2.4.1 Koregistrace dat

Koregistrace je jedním ze základních kroků interferometrie. Probíhá na bázi práce s odpovídajícími si pixely ve zpracovávaných snímcích. Používá se pro dvojici SLC snímků, kdy se jeden ze snímků označuje jako hlavní (*master*) a druhý jako vedlejší (*slave*), a slouží k zajištění toho, aby daný bod na zemi odpovídal stejnému pixelu v obou snímcích. Proto je nutné převzorkovat vedlejší snímek do rastrové mřížky hlavního snímku. V ideálním případě paralelních drah oběhu se u koregistrace kompenzuje pouze rozdílná geometrie způsobená rozdílným úhlem pohledu (parallax effect). Reálně se při koregistraci musí počítat také s křížením/zkosením drah oběhu (Obr. 3), různým nastavením senzorů, rozdílným vzorkováním a podélnými a příčnými posuny dráhy (Zhengxiao, Bethel 2008; Ferretti et al. 2007a).



Obr. 3 Rozdílné zkosení drah oběhu

Zdroj: Ferreti et al. 2007b

Interferogram může být generován již na základě hrubé koregistrace s přesností jednoho nebo dvou pixelů, ale výsledky nejsou optimální. Pro potřeby kvalitních výstupů je vyžadována jemná koregistrace se subpixelovou přesností. Ta probíhá na úrovni subpixelových posunů a jsou při ní zjišťovány maximální korelační hodnoty pro pohledová okna rozmístěná rovnoměrným způsobem po celém snímku. V místech maximální korelace jsou jejich hodnoty interpolovány a nalezena maximální korelace na subpixelové úrovni (Zhengxiao, Bethel 2008).

2.4.2 Filtrace v příčném směru

Filtrace v příčném směru zajišťuje filtraci spektra dvojice koregistrovaných snímků a je volitelným prvkem v procesu zpracování radarové interferometrie. Tato filtrace je výpočetně a časově náročným procesem, ale na druhé straně přináší zlepšení v poměru signálu k šumu (SNR) v interferogramu a zlepšuje výsledky koherence (Reigber 1999).

Toto zmírnění šumu je způsobeno odfiltrováním těch částí spektra, které se vzájemně v koregistrovaných obrazech nepřekrývají. To je způsobeno rozdílnými úhly, kterými se radarový paprsek odráží od terénu v obou snímcích. Zároveň platí pravidlo, že čím delší je kolmá základna, tím větší je část spektra obrazů, která se nepřekrývá. Pokud je dosaženo kritické základny, spektrum snímků se nepřekrývá vůbec (Ferretti et. al 2007c).

2.4.3 Vytvoření Interferogramu

Přesnost digitálního modelu povrchu je závislá na kvalitě interferogramu. Při generování interferogramu se využívá komplexního násobení odpovídajících si pixelů Hermitovské matice A^* dvojice koregistrovaných snímků.

$$v_i = u_m \times u_s^*$$

kde u_m je hlavní snímek a u_s vedlejší snímek, přičemž každý pixel se skládá z amplitudové a fázové složky a platí tedy:

$$u_i = |u_i| \exp(j\Phi_i)$$

Tento výpočet zajišťuje, že interferogram je registrován ve stejném azimutu a šikmém pohledu (*slant range*), jako hlavní snímek a fázová složka je rozdílem fází mezi oběma obrazy (Ferretti et al. 2007b).

Výsledný interferogram je nositelem relativní výškové informace. Ta je vyjádřena interferometrickými proužky (*fringes*), které jsou od sebe odděleny fázovými diskontinuitami, přičemž výškové rozdíly mezi nimi odpovídají přesně fázovému posunu 2π . Fázové diskontinuity jsou podobné izohypsám, protože v plochém terénu mají malou hustotu a v členitém terénu naopak hustotu větší (Ferretti et al. 2007c).

Interferometrické proužky se nazývají také jako výšky ambiguity (nejednoznačnosti), z kterých lze vypočítat změnu interferometrické fáze a tedy výškovou změnu odpovídající 2π . Výška ambiguity je nepřímo úměrná velikosti kolmé základny:

$$h_a = \frac{\lambda R \sin \theta}{2B_n},$$

kde R je šikmá vzdálenost, B_n kolmá základna a θ úhel pohledu (Rosen et al. 2000).

Platí, že delší kolmá základna má pozitivní vliv na přesnost nadmořské výšky. Pokud je však kolmá základna moc dlouhá, dochází ke snížení koherence. Existuje hranice délky základny (tzv. kritická základna), od které se interferometrický signál stává dekorelovaným a interferometrické proužky nemohou být generovány. Tato hranice se odvíjí od vlnové délky záření a rozlišení senzoru v šikmém směru (Rott 2009).

Optimální délka základny, která maximalizuje poměr signál k šumu, je 100 – 300 m (Ferretti et al. 2007a). Vzhledem k vyšší kvalitě určení orbitálních parametrů a tudíž menší geometrické dekorelaci, se délka kolmé základny u dat Sentinel-1 pohybuje do 100 m (Salvi 2012).

2.4.4 Odhad koherence

Důležitým parametrem pro radarovou interferometrii je koherence (nebo také *complex correlation coefficient*). Udává spolehlivost a kvalitu výsledného interferogramu. Jedná se tedy o míru podobnosti obou snímků a odhad fázového šumu. Hodnota koherence se pohybuje v intervalu od 0 do 1 a ukazuje kvalitu interferogramu v oblasti okolo určitého pixelu. Hodnoty blížící se 1 značí data bez šumu a udávají větší podobnost mezi zpracovávanými snímky. Naopak hodnoty blížící se 0 značí, že interferometrická fáze je jen šum a tedy snímky vykazují minimální podobnost. V tomto případě se mluví o dekorelaci (Rott 2009).

V případě interferometrických obrazů je amplituda každého pixelu $|v|$ úměrná součinu amplitud, $|u_m|$, $|u_s|$ původních obrazů a jejich fáze je rovna rozdílu původních fází (Rosen et al. 2000).

Fázový šum se mění od pixelu k pixelu vzhledem k rozdílnému vlivu náhodného šumu vrstveného na náhodné amplitudy pixelů. Pixely se slabým odrazem ukazují více rozptýlenou interferometrickou fází, naproti tomu pixely se silným odrazem přinesou spolehlivější fázi. Kromě toho existují významné změny mezi těmito dvěma přírůstky, temporální (kvůli změně úhlu pohledu) a kvůli náhodnému šumu (Ferretti et al. 2007c).

Výpočet koherence probíhá dle následujícího vzorce:

$$\gamma = \frac{E[u_m u_s]}{\sqrt{E[|u_m|^2] E[|u_s|^2]}} ; |\gamma| < 1,$$

kde E je očekávaná střední hodnota pro náhodně proměnné x , u_m je hlavní snímek a u_s je vedlejší snímek (Ferretti et al. 2007c).

Na koherenci mají vliv prostorová i časová základna. Zatímco delší prostorová základna má vliv na charakteristiky jako je úhel pohledu a s tím související stín terénu, tak delší časová základna může vést ke změnám ve vegetaci nebo jiných zemských površích. Můžou zde hrát svou roli také sezónní efekty jako množství sněhu, a proto je vhodné vybírat snímky ze stejného ročního období (Ferretti et al. 2007b).

Výstupem je mapa koherence, která se počítá pomocí pohyblivého okna, které se pohybuje nad oběma snímky. Tato mapa znázorňuje přesnost vytvořeného interferogramu.

Společné využití koherence a amplitudové složky umožňuje lepší segmentaci obrazu. Zatímco amplituda závisí na elektromagnetické struktuře objektu, koherence je závislá na mechanické stabilitě. Například v otevřených polích se stupeň koherence blíží lineární závislosti na biomase a výšce plodin, čehož se dá

využít při klasifikaci plodin a dalších typů povrchu (Moeremans, Dautrebande 1999). Dalšími z aplikací koherence mohou být detekce ledových polí, lesních požárů nebo klasifikace pro oddělení jehličnatých a listnatých lesů (Schmullius 1999 cit. v Ferretti et al. 2007b).

2.4.5 Odstranění referenční fáze

Interferometrická fáze může být rozdělena do dvou příspěvků:

- Variace fáze úměrná výškovému rozdílu q mezi cílovým bodem a vodorovnou referenční rovinou.
- Variace fáze úměrná posunutí v šikmém směru s z cílového bodu.

$$\Delta\Phi = -\frac{4\pi B_n * q}{\lambda R \sin\theta} - \frac{4\pi B_n * s}{\lambda R \tan\theta}$$

kde B_n je kolmá základna, která je známá z přesných orbitálních dat. R je vzdálenost od povrchu k radaru a θ je úhel dopadu (*incidence angle*).

Tato operace se nazývá *interferogram flattening* (odstranění referenční fáze, tj. vlivu referenční plochy – elipsoidu) a jejím výsledkem je mapa interferometrické fáze odpovídající relativní nadmořské výšce elipsoidu (Ferretti et al. 2007a).

Referenční fáze je počítána v software SNAP pro každý bod vztažného DMP spolu se souřadnicemi hlavního snímku a je interpolována pomocí Delaunayho triangulace. Následně je odečtena komplexním násobením od interferogramu pomocí vzorce:

$$I = I(\cos I\Phi - i * \sin I\Phi)$$

kde I je komplexní interferogram a $I\Phi$ je referenční fáze v konkrétním bodě.

2.4.6 Filtrace fázové složky

Interferometrická data jsou obvykle zatížena chybami termálního šumu, temporálních změn a geometrie základny. Filtrování fáze (nejčastěji pomocí adaptivních filtrů) je technika předzpracování dat, která má za úkol tyto chyby eliminovat nebo alespoň co nejvíce zmírnit (Goldstein, Werner 1998).

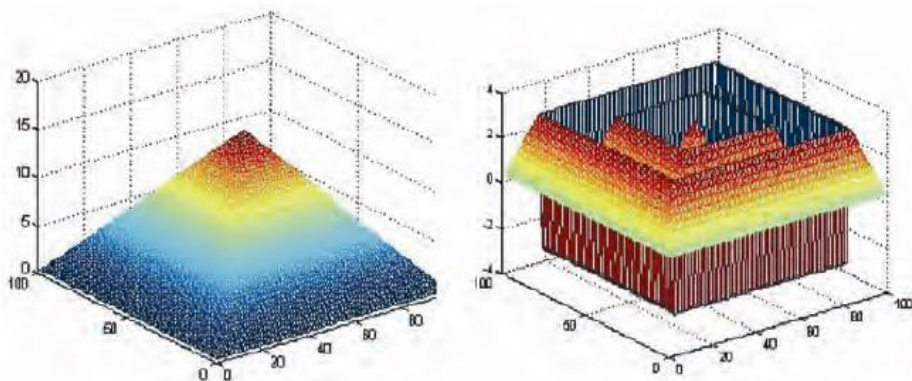
2.4.7 Rozbalení fáze

Rozbalení fáze je náročným krokem pro transformaci relativního zabaleného fázového obrazu s hodnotami v intervalu $\langle -\pi, \pi \rangle$ do produktu s absolutními hodnotami fáze (Obr. 4). Ty lze využít k tvorbě DMR nebo k diferenční interferometrii (Rott 2009).

Sinusoidická a periodická povaha radarové vlny způsobuje stejnou hodnotu fáze u plošek/vzdáleností, které se liší o celočíselné násobky vlnové délky.

Cílem rozbalení fáze je získání celého čísla cyklů n dodaného k zabalené fázi Φ , aby jednoznačná (*unambiguous*) hodnota fáze Ψ byla získána pro každý pixel obrazu:

$$\Psi = \Phi + 2\pi \cdot n$$



Obr. 4 Rozbalená fáze a původní zabalená fáze

Zdroj: Ferretti et al. 2007c

Nejčastější metodou je jednoduchá integrace rozdílů fází začínající ze vztažného bodu. Nicméně tato metoda není kvůli diskontinuitám fáze vždy bezchybná. Většina algoritmů pracuje s předpokladem, že rozbalená fáze je hladká a mění se plynule, pomalu. To znamená, že u sousedících pixelů existuje předpoklad, že jejich rozdíl je v intervalu poloviny fázového cyklu (π radiánů). Tato hypotéza je pravdivá pro většinu pixelů v obraze, ale přítomnosti fázových diskontinuit (sousedních pixelů s nárůstem fáze větším než π radiánů) způsobují nespojitosti. Existují algoritmy, které se s těmito diskontinuitami zabývají a řeší je. Jsou jimi např. vážená/nevážená metoda nejmenších čtverců, *minimum cost flow* nebo *branch – cut* (Ferretti et al. 2007b).

2.4.8 Transformace fáze na výšku

Po rozbalení fáze je možné lokalizovat každý pixel v systému kartézských souřadnic a ze SAR souřadnic (range, azimuth, phase variation) získáme informaci lokální topografie. Tato informace je následně přepočítána na nadmořskou výšku vzhledem k referenčnímu elipsoidu a převzorkována do rastrové mřížky.

K interpolaci rastrového souboru, je dle Wackernagela (2003) možné použít jednu z následujících technik:

- Nearest neighbour (NN)
- Delaunay triangulation and linear interpolation (DT)
- Inverse distance weighting (IDW)
- Kriging Interpolation (KI)

Nejjednodušší metodou na výpočet je NN. Kompromisem mezi kvalitou a výpočetním časem jsou metody DT a IDW, které jsou používány ve většině aplikací. Výpočetně nejnáročnější metodou je KI, ale zároveň velmi dobře odstraňuje artefakty v prudkých svazích (Ferretti et al. 2007b).

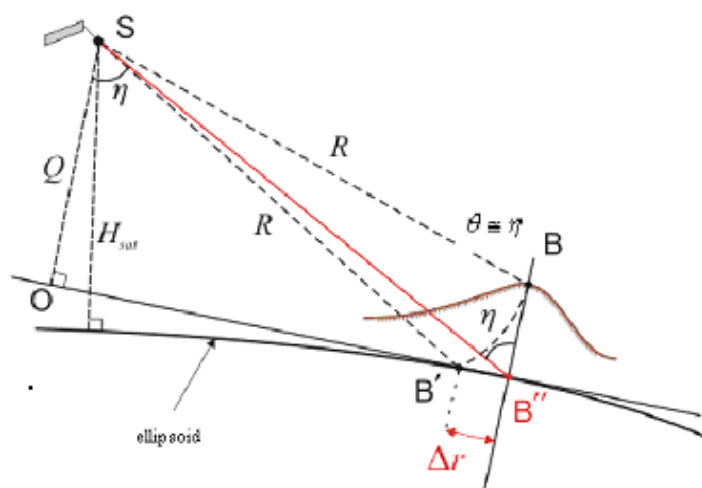
Kromě šumu a chyb vzniklých při rozbalování fáze je přesnost vzniklého modelu závislá na přesnosti orbitálních vektorů určujících dráhu oběhu. Pokud nejsou tato přesná data k dispozici, je možné je nahradit GCP se známými souřadnicemi (Ferretti et al. 2007b).

Sentinel – 1 používá anténu s bočním pohledem vpravo. V důsledku toho jsou svahy orientované na západ na scénách pořízených z výstupných (*ascending*) drah zkráceny. Naopak východně orientované svahy jsou zkráceny na snímcích ze sestupných (*descending*) drah satelitu. V území se svahy v obou těchto směrech je pro vysoce kvalitní DEM nejlépe získat kombinaci snímků ze sestupných i výstupných drah (Crosetto 2002).

2.4.9 Terénní korekce

V důsledku topografické variace území na radarovém snímku a naklonění senzoru na satelitu jsou vzdálenosti v obraze zkresleny. Terénní korekce jsou určeny k tomu, aby tato zkreslení kompenzovaly a geometrická reprezentace obrazu byla co nejvěrnější skutečnému terénu (Loew, Mauser 2007).

Obr. 5 ukazuje posun bodu B (ve skutečnosti) s nadmořskou výškou h do pozice B' (v SAR snímku) ze správné pozice na elipsoidu B'' o délku Δr .



Obr. 5 Topografické zkreslení v SAR snímku

Zdroj: ESA (2016c)

Terénní korekce potřebují pro svůj výpočet DMR či DMP s vysokým rozlišením a dodatkové informace o oběžné dráze senzoru. Samotná korekce probíhá dle Loewa a Masuera (2007) v následujících krocích:

- Souřadnice vztažného DMP a DMP získaného pomocí radarové interferometrie jsou transformovány do stejného (typicky Kartézského) referenčního rámu (např. WGS 84).
- Využití orbitálních vektorů – doplňkové informace o pozici senzoru v momentu snímání a rychlostního vektoru k získání přesné informace o poloze každého pixelu na povrchu Země.
- Iterativní řešení Range-Dopplerovské rovnice k nalezení odpovídajících si párů pixelů v obou DMR.
- Pro každý pixel je spočítána vzdálenost v příčném směru a „zero – Doppler“ směru (nejbližší možná vzdálenost mezi radarem a snímaným bodem), které jsou konvertovány do obrazových souřadnic.
- Pro každý pixel mohou být spočítány dodatečné informace, jako místní úhel dopadu (*incidence angle*) nebo oblasti překrytu a zastínění.

2.5 Data Sentinel-1

2.5.1 Základní charakteristika Sentinel-1

V rámci globálního monitoringu životního prostředí a bezpečnosti (GMES) se Evropská kosmická agentura (ESA) ujala vytvoření a rozvoje programu Sentinel, jehož součástí jsou v současné době tři vesmírné mise Sentinel-1, Sentinel-2 a Sentinel-3 (Torres et al. 2012).

Mise Sentinel-1 je mise určená k pokračování a zlepšení SAR služeb a aplikací poskytovaných v rámci ESA. Navazuje na již ukončenou misi Envisat a družice ERS-1 ERS-2. Je zajišťována pomocí dvou orbitálních družic určených k snímání Země v denních i nočních hodinách a za každého počasí a pomocí pozemní infrastruktury, která je zodpovědná za plánování, kontrolu, zpracování, uchovávání a šíření dat (Torres et al. 2012).

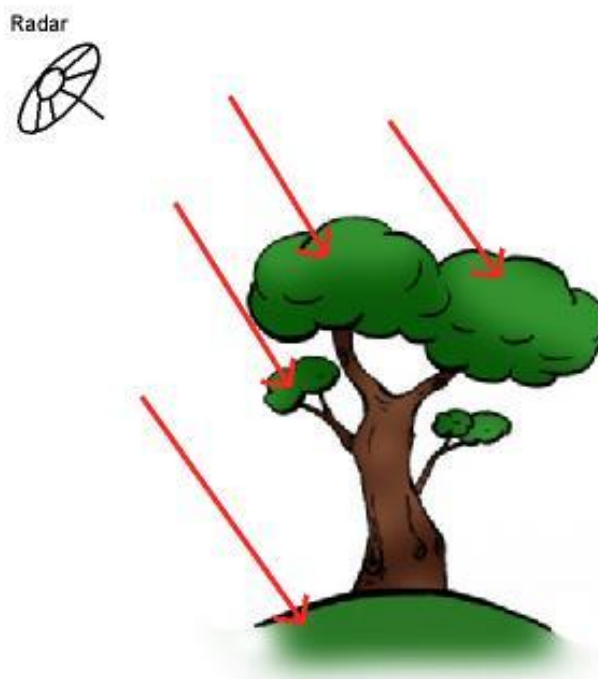
Každý ze satelitů obíhá Zemi po polární, helio-synchronní dráze ve výšce 693 km nad povrchem Země s dobou oběhu s dvanácti denním oběhovým cyklem. To znamená, že jedno místo je díky oběma satelitům snímáno ve frekvenci 6 dní.

Sentinel-1a byl vypuštěn z francouzského kosmodromu ve Francouzské Guyaně 3. 4. 2014 a jeho dvojče Sentinel-1b ze stejného místa 25. 4. 2016. Tyto družice snímají na vlnové délce 5,6 cm a frekvenci 5 404 GHz, což spadá do kategorie spektrálního pásma C. Pozice pásma C v SAR spektru je zachycena v Tab. 2.

Spektrální pásmo	Frekvence (GHz)	Vlnová Délka (cm)
Mm	40 - 100	0,75 - 0,30
Ka	26,5 - 40	1,1 - 0,75
Ka	18 - 26,5	1,7 - 1,1
Ku	12,5 - 18	2,4 - 1,7
X	8 - 15,5	3,75 - 2,4
C	4 - 8	7,5 - 3,75
S	2 - 4	15 - 7,5
L	1 - 2	30 - 15
UHF	0,3 - 1	100 - 30

Tab. 2 Pásma SAR a jejich vlnové délky

Výhoda C-band radaru je v propustnosti záření atmosférou, a to i silnými vrstvami oblačností. Další vlastností je průnik do svrchních vrstev půdy a vegetace (Obr. 6), což otevírá možnosti při zkoumání kvality a vlastností půd nebo měření biomasy (Bourgeau-Chavez et al. 2009). V případě vysokého multitemporálního rozlišení může být dalším využitím klasifikace plodin (Skriver et al. 2011) nebo celého krajinného pokryvu (Niu, Ban 2010).



Obr. 6 Snímání povrchu pomocí pásma C

2.5.2 Úrovně, produkty a operační módy Sentinel-1

Data poskytovaná v rámci mise Sentinel-1 se dělí do tří úrovní podle stupně zpracování a možností využití (Torres et al. 2012):

- 1) Level -0 – tato úroveň obsahuje tzv. raw data bez jakýchkoliv úprav a není běžně dostupná.
- 2) Level -1 – běžně dostupná úroveň, která poskytuje k vývěru dva druhy dat:
 - a) SLC - Single look complex – zachovává fázovou složku a je vhodný pro interferometrické zpracování.
 - b) GRD - Ground range detected – neobsahuje fázovou složku, proto je jeho datový objem několikanásobně menší než u SLC. Za cenu redukce speckle noise je sníženo geometrické rozlišení.
- 3) Level-2 – Obsahuje geofyzikální komponenty odvozené z Level-1, určené pro aplikace měření větru, vln a proudů v oceánu.

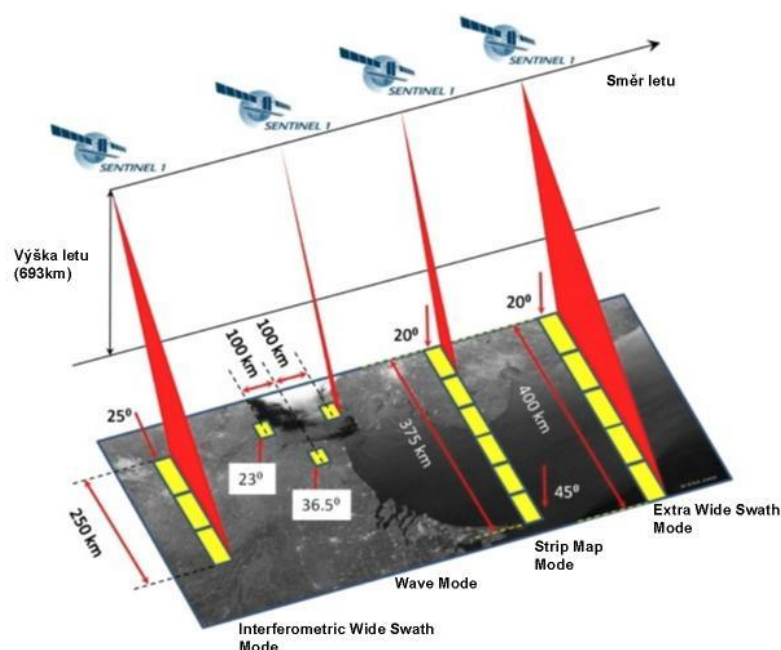
O využití, zpracování, distribuci a archivaci pořízených dat se stará Payload data ground segment (PDGS), pracující v rámci European space research institute (ESRIN). Všechna data získaná v rámci mise jsou systematicky zpracovávána do předdefinovaných produktů:

- Globální produkty jsou zpracovávány ze všech úrovní dat a jsou k dispozici do tří hodin v případě oblastí zařazených do operačního plánu vysoké důležitosti (HLOP) a v ostatních případech do 24 hodin od data pořízení. Jsou k dispozici online a uchovávány pro dlouhodobě využití.
- Regionální produkty jsou vytvářeny pouze ve vymezených oblastech (HLOP) z celkového objemu všech dat. Zpracovávají se z Level-1 SLC dat, mají stejný čas pořízení a archivaci jako globální produkty.
- Lokální produkty jsou určeny pro služby, kde je vyžadována vysoká rychlost dodání dat (zejména pro potřeby námořnictva v Evropských vodách, např. námořního dohledu). Tyto produkty zpracovávají raw data, jejichž výstupy jsou schopny dodání během 10 minut. Platí zde stejný způsob archivace jako u předchozích produktů.

Poskytovaná data se dále dělí podle operačního módu, v kterém byla pořízena Obr. 7. Ty se liší úhlem pohledu, šířkou záběru, prostorovým rozlišením, polarizačními kanály a následným způsobem využití Tab. 3.

Operační mód	Úhel pohledu [°]	Rozlišení [m]	Šířka záběru [km]	Polarizace
Strip map (SM)	20 - 45	5 x 5	80	HH+HV, VH+VV, HH, VV
Interferometric Wide swath (IW)	29 - 46	5 x 20	250	HH+HV, VH+VV, HH, VV
Extra Wide swath (EW)	19 - 47	20 x 40	400	HH+HV, VH+VV, HH, VV
Wave	22 - 38	5 x 5	20 x 20	HH,VV

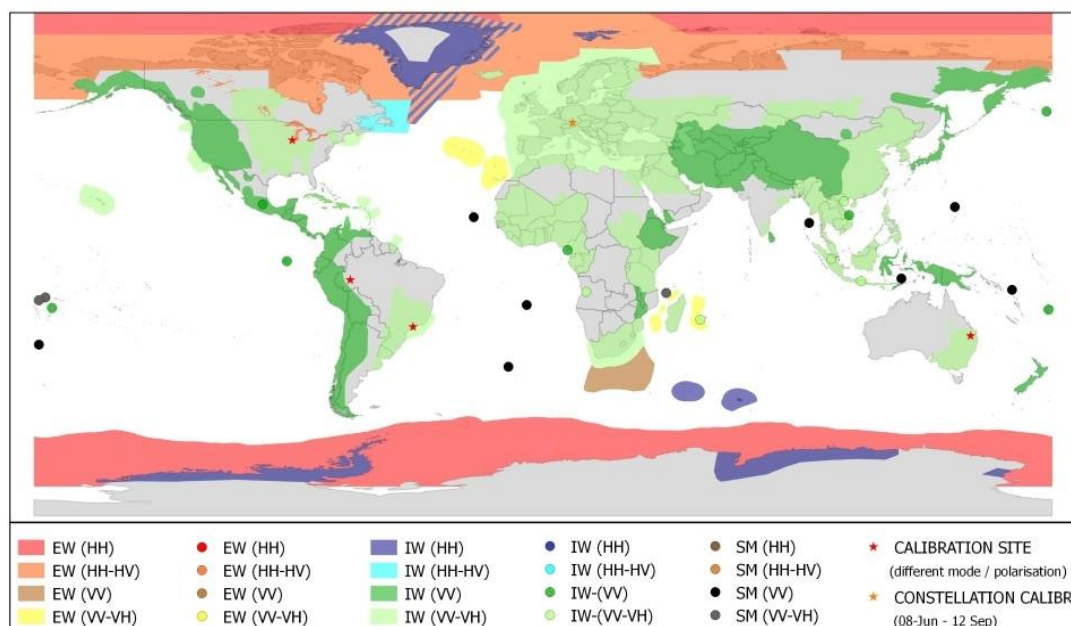
Tab. 3 Operační módy Sentinel-1



Obr. 7 Operační módy Sentinel-1

Zdroj: Torres et al.2012

Sentinel-1 je poskytuje produkty s jednotlivou (*single polarization*) nebo dvěma (*dual polarization*) polarizacemi. To se liší podle módu pořízení (Tab. 3) a snímaného území (Obr. 8). Každý orbitální cyklus družice se s typem poskytované polarizace může mírně změnit. Mapu pro každý orbitální cyklus poskytuje ESA na svých internetových stránkách (ESA 2016b). Česká republika se vždy nachází v oblasti, kde je poskytovaný IW mód s duální kombinací polarizace VV+VH.



Obr. 8 Poskytované typy polarizace (cyklus 82)

Zdroj: ESA 2016b

2.5.3 Aplikace dat Sentinel-1

Data pořízená družicí Sentinel-1 mají díky svému vysokému temporálnímu rozlišení, středně dobrému prostorovému rozlišení, velikosti scén a globálnímu pokrytí široké využití (Salvi et al. 2014).

Husté časové řady jsou velkou výhodou pro sběr spektrálních příznaků. Těch lze následně využít pro klasifikaci krajinného pokryvu, velmi dobrého oddělení zemědělských a travnatých ploch na základě rozdílného spektrálního chování v jarním a podzimním období a také klasifikaci jednotlivých zemědělských plodin. To vše lze provádět u velkých územních celků (Satalino et al. 2014).

Krátká časová základna mezi dvojicemi snímků a snímání v pásmu C umožňují produkci digitálních modelů povrchu (Nikolakopoulos, Kyriou 2015). Dostupnost dat Sentinel-1 jejich navíc umožňuje zajistit jejich globální produkci.

Zpracování diferenční interferometrie je užitečné při velmi přesném měření (v řádu milimetrů) deformací zemského povrchu provázejících zemětřesení, při seismologických analýzách a zpětných rekonstrukcích. Dále mohou představovat velmi dobrý zdroj informací při tvorbě nebo aktualizaci map rizikových území, a to díky schopnosti měřit terénní změny v řádu milimetrů. Tato měření zlepšují vědecké chápání tektonických procesů a mohou přispět k prevenci a vymezení rizikových oblastí. Tyto analýzy mohou být velmi vhodné pro hustě osídlená území s historickými památkami. Výhodou je možnost měření ve dne i v noci a za každého

počasí a také velikost scén se středně dobrým rozlišením. Tyto přednosti mohou zajistit vytvoření velkého sdíleného globálního archivu dat (Copernicus 2013a).

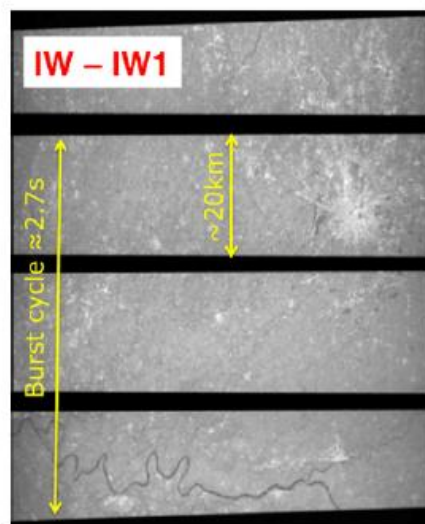
Aplikace diferenční InSAR může najít své využití v oblastech, kde se nachází množství infrastruktury, jako jsou silnice, mosty, železnice a letiště (např. velká část Evropy). Z důsledku vnějších vlivů, jako je počasí nebo stále vzrůstající množství dopravního vytížení v horizontálním i vertikálním směru, se stává země pod a v okolí těchto struktur nestabilní a může tak sesedat. Z těchto důvodů je nutné stav monitorovat a vyhnout se kritickým stavům a ohrožení veřejné bezpečnosti. (Copernicus 2013b).

2.5.4 Poskytování dat a jejich předzpracování

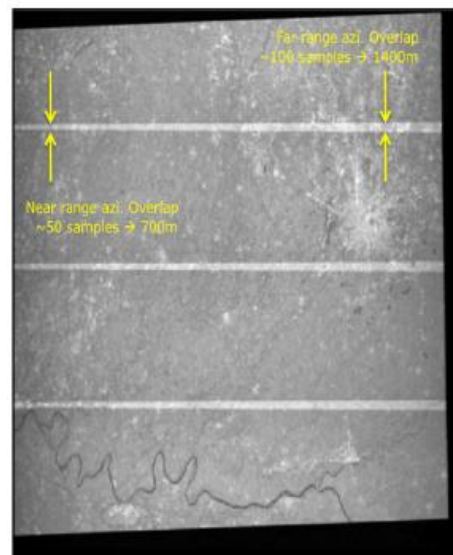
Data z družice Sentinel-1a jsou po uživatelské registraci volně dostupná ze stránek Sentinels Scientific Data Hub (ESA 2016a). Toto datové úložiště umožňuje vyhledání cílových dat pomocí nakreslení ROI nebo vyhledání pomocí klíčových slov (např. město, řeka apod.). Hledání se dá dále blíže specifikovat pomocí data pořízení snímku, typu polarizace, šířky záběru, operačního módu senzoru, typu produktu nebo relativní orbitální dráhy. Vyhledaná data mohou být stažena nebo vložena do košíku, kde jsou kdykoliv k dispozici. Jelikož jsou data velmi objemná (snímky GRD 1GB a SLC snímky dokonce 8GB), je vhodné stahovat je pouze se stabilním připojením. S jejich objemem souvisí také požadavky na zpracovatelský HW. K plynulé práci se SLC daty je požadovaná paměť RAM alespoň 8GB.

Produkty *Interferometric wide swath mode*, které se používají pro InSAR, obsahují vždy 3 spojené snímky (*sub-swaths*). Každý jednotlivý snímek obsahuje samostatný polarizační kanál pro každý typ polarizace, který byl pořízen. To znamená, že tyto produkty obsahují celkem 3 snímky pro produkty s jednou polarizací (*single polarisation*) a 6 snímků pro produkty s dvojitou polarizací (*dual polarisation*). Pro účely práce pouze s jedním z těchto obrazů, je možné originální produkt rozdělit (ESA 2016c).

Každý obraz se skládá ze série pásů (*bursts*), které se částečně překrývají ve směru azimutu. Každý z těchto pásů byl zpracován jako samostatný SLC obraz. Tyto pásy jsou odděleny černými pruhy (Obr. 9). Při zpracování dat jsou tyto pruhy odstraňovány za předpokladu zachování fáze pomocí funkce S1-TOPS Deburst (Torres et al. 2012).



IW SLC



IW SLC de-burst

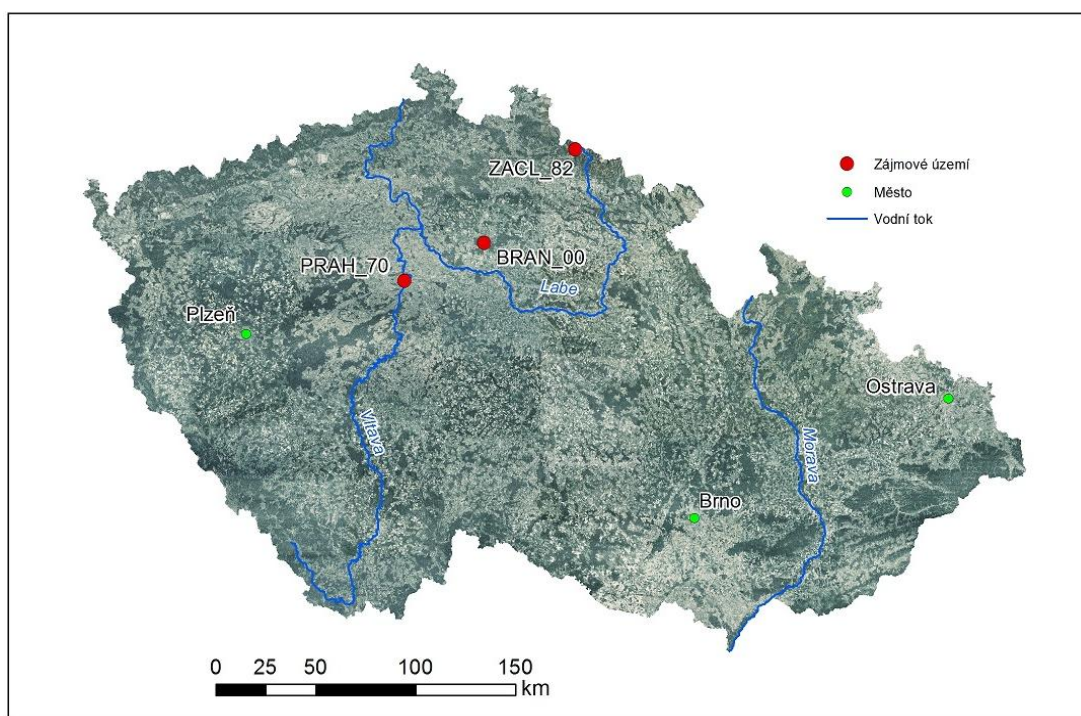
Obr. 9 S1-TOPS Deburst

Zdroj: Torres et al. 2012

3 Zájmová území a data

3.1 Zájmová území

Zájmová území byla zvolena tak, aby mohlo být zjištěno co nejvíce informací o využitelnosti dat Sentinel – 1. Proto byly vybrány tři oblasti lišící se z hlediska vegetačního a urbanistického i geomorfologického (Obr. 10 a Obr. 11, Tab. 4 a Tab. 5). Velikost území byla volena dle kladu listů SM5, což je výdejní jednotka, v jejímž rozsahu poskytuje ČÚZK svá data DMP 1G. Jeden list má rozměry 2,5x2km. (ČÚZK 2016a).



Obr. 10 Přehledová mapa zájmových území

Zdroj dat: ČÚZK, 2016b

Seznam zájmových území dle kladu mapových listů:

- BRAN_00 – Agrární území s nízkým stupněm zalesnění a s minimálním množstvím urbánních prvků. Z geomorfologického hlediska rovinaté území bez většího převýšení nebo svahů.
- PRAH_70 – Urbánní území tvořené z větší části zástavbou pražské městské části Dejvice, z menší poté lesoparkem Stromovka. Převýšení je tvořeno mírným svahem zvedajícím se od řeky Vltavy k Hradčanům.

- ZACL_81 – Geomorfologicky velmi členité území s prudkými svahy s velkým převýšením. Část území je zalesněna a část je tvořena holou půdou nebo nízkým horským porostem.

	Lesní porost [%]	Zástavba [%]	Holá půda + travní porosty [%]	Vodní plochy [%]
BRAN_00	6,78	1,66	91,56	0,00
PRAH_70	14,66	70,34	11,99	3,01
ZACL_81	68,85	0,00	31,15	0,00

Tab. 4 Procentuální podíl krajinných pokryvů dle Corine Land Cover (Cenia 2012) s úpravou dle ortofota ČÚZK (ČÚZK 2016b)

	Minimum [m]	Maximum [m]	Průměr [m]
BRAN_00	205,06	240,07	213,40
PRAH_70	175,57	284,64	216,14
ZACL_81	852,08	1546,37	1234,74

Tab. 5 Topografické charakteristiky jednotlivých území



(a)

(b)



(c)

Obr. 11 Ortofoto zájmových území: (a) BRAN_00, (b) PRAH_70, (c) ZACL_81

Zdroj dat: ČÚZK, 2016b

3.2 Data

V práci byly využity dva typy dat. Snímky Sentinel-1 pro potřeby vytvoření DMP pomocí InSAR a data LLS DMP 1G pro potřeby validace a statistického porovnání extrahovaných DMP.

3.2.1 Výběr dat Sentinel-1

Data Sentinel-1 pro tvorbu DMP byla vybrána na základě několika rozhodujících faktorů:

- Časová základna – data s identickou orbitální drahou nad jedním územím získat v intervalu snímání 24 dní (některá území – ne celý obraz v rozpětí 12 dní). Pro potřeby tvorby DMP byla preferována data s co nejkratší časovou základnou, která zaručují co nejlepší stabilitu a homogennost terénu. Ta je vyžadována kvůli získání co nej kvalitnější koherentní mapy, přičemž koherence je závislá na mechanické stabilitě povrchu. Například vodní tělesa mají malý stupeň koherence, protože se neustále pohybují. Proto se na koherentních mapách zobrazují černou barvou.
- Území - DMP byl vytvořen pro území s různými geomorfologickými a vegetačními vlastnostmi.
- Časové období – byly zpracovány snímky ze zimního období přelomu let 2015/2016. Toto období bylo homogenní z hlediska změn vegetačního krytu a bez sněhové pokrývky.
- Dráha letu při snímání – z důvodu zastínění některých svahů při použití pouze jedné z drah letu (viz 4.1.10) byla použita kombinace sestupných i výstupných drah.

3.2.2 DMP 1G

DMP 1G je jedním z realizačních výstupů Projektu tvorby nového výškopisu České republiky zpracovaného v rámci společné iniciativy ČÚZK (Český úřad zeměměřičský a katastrální), MO (Ministerstvo obrany) a MZe (Ministerstvo Zemědělství) České republiky (Dušánek et al. 2015).

Data byla pořízena pomocí LLS v rozmezí let 2010 – 2013. Výstupy byly zpracovány, filtrovány a případně manuálně editovány. Výsledkem byly DMR 4G, DMR 5G a z něj automatizovanými postupy odvozený DMP 1G. Je to tedy DMR 5G doplněný o objekty nad zemským povrchem. V intravilánu jsou přidány body, vyhodnocené jako budovy, shodující se s obrysy z katastru nemovitostí. Vegetační prvky jsou přidány v případě, že jejich plocha dosahuje alespoň 25m² (Dušánek 2014).

Model je tvořen nepravidelnou sítí výškových bodů (TIN) s úplnou střední chybou 0,4m pro přesně vymezené objekty (budovy) a 0,7m pro objekty přesně neohraničené (lesy a další rostlinný pokryv). Používá se k analýzám výškových poměrů terénu a geografických objektů, které se na něm vyskytují, při analýzách viditelnosti, šíření radiových vln nebo různých škodlivých látek (ČÚZK 2016a).

3.3 SNAP 3.0

K předzpracování, analýzám a dalším operacím s daty získanými ze SCI hubu je nejvhodnější volně dostupný software SNAP. Ten pod sebou sdružuje toolboxy pro zpracování dat ze všech dostupných satelitů Sentinel. Byl vyvinutý agenturou ESA speciálně pro zpracování těchto dat, ale podporuje také práci s velkým množstvím jiných radarových i optických dat (ESA 2016c).

K výhodám práce s daty Sentinel patří také neustále se rozrůstající a spolupracující komunita uživatelů. Ta se setkává na STEP fóru, určeném k těmto účelům. Po volné registraci je možné diskutovat s ostatními uživateli nebo přímo tvůrci SNAPu a poskytovateli dat Sentinel (ESA 2016d).

4 Metodika zpracování

Tato kapitola se věnuje procesu zpracování, jeho jednotlivým krokům a také nastavení či výběru parametrů vstupujících do procesu výpočtu.

Postup tvorby DMP pomocí radarové interferometrie je složen z několika hlavních kroků, které mohou být pro potřeby přesnějších výsledků doplněny o některé kroky volitelné. V každém jednotlivém kroku je zapotřebí věnovat pozornost parametrům, které mohou hrát velkou roli a znatelně ovlivnit výsledné produkty, ale také časové náročnost a potřebám určité výpočetní kapacity.

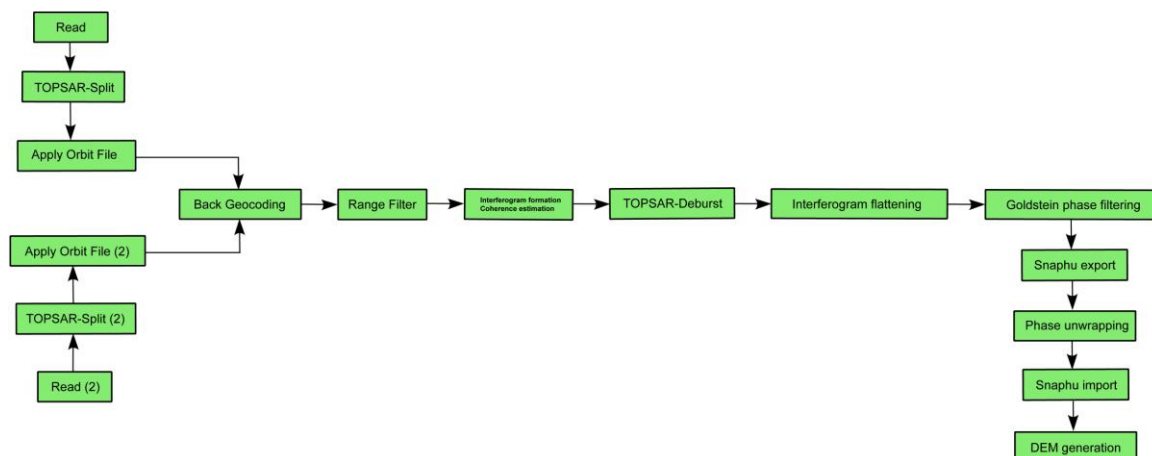
V první fázi proběhlo důkladné a podrobné seznámení se s daty Sentinel – 1 a softwarem pro zpracování těchto dat SNAP 3.0. V procesu tvorby metodického postupu byly použity veškeré dostupné zdroje o těchto nových datech, přičemž i ty se v čase vyvíjely (STEP fórum, SCI hub) a tím se měnil a vyvíjel postup zpracování. V druhé fázi byl sestaven metodický postup, testovány metody zpracování a nastavení parametrů ovlivňující jednotlivé kroky. Tento postup byl následně aplikován na data pokrývající zájmová území, přičemž byl použit stejný postup pro všechna tato území.

Na samém začátku je nutné poznamenat, že v procesu tvorby DMP z radarových dat existují faktory, které nemůže zpracovatel ovlivnit, ale které ovlivňují kýžený, tedy ideální výsledek (např. atmosférické vlivy). Výhodou dat Sentinel-1 je možnost relativně jednoduchého nahrazení nevhodných dat daty jinými, a to díky jejich vysokému temporálnímu rozlišení.

4.1 Postup tvorby DMP

Zpracování radarových dat od načtení dat po tvorbu DMP proběhlo v software SNAP 3.0. Obr. 12 znázorňuje postupně jednotlivé kroky.

Rozbalení fáze bylo jedinou částí v tomto postupu, které proběhlo externě, mimo software SNAP, a to spuštěním algoritmu SNAPHU přes příkazovou řádku ve virtuální mechanice VMware player, která vytváří virtuální prostředí operačního systému Linux.



Obr. 12 Postup zpracování v software SNAP 3.0

4.1.1 Načtení dat (Data read)

Data Sentinel-1 stažená ze SCI hubu je možné v software SNAP otevřít buď zabalená v *.zip* formátu nebo rozbalená pomocí souboru *.manifest*. Další práci s daty získáváme výstupy ve formátu *.dim*.

4.1.2 Koregistrace dat (S1 TOPS Coregistration)

Koregistrace radarových dat Sentinel – 1 je možná pouze za předpokladu stejných relativních orbitálních drah a za použití stejného IW subswath.

V prvním kroku byl proveden výběr hlavního a vedlejšího snímku pomocí funkce *InSAR stack overview*, kde byly získány hodnoty kolmé a časové základny a bylo určeno, který snímek je vhodný právě jako hlavní a který jako vedlejší.

Samotnému procesu koregistrace dále předcházela aplikace *Apply orbit file* (přesná orbitální data), tedy aktualizace orbitálních vektorů v metadatech, což zajišťuje zpřesnění informace o pozici a rychlosti pohybu satelitu v době snímání. Tato data jsou pro daný snímek poskytována agenturou ESA tři měsíce po snímání.

Pro snížení objemu zpracovávaných dat a výpočetní náročnosti bylo provedeno rozdělení původního snímku do jednotlivých částí (IW subswaths), pomocí funkce TOPSAR – Split a vybrána pouze ta část, kde se vyskytovala zájmová území. V této funkci je implementován také výběr jedné z polarizací (viz kapitola 5.1).

V posledním kroku proběhla samotná koregistrace master a slave snímku za pomoci přesných orbitálních dat a referenčního DMR.

Koregistrace radarových dat za pomoci referenčního DMR dosahuje vždy srovnatelných nebo lepších výsledků než jiné metody koregistrace. S lepším prostorovým rozlišením referenčního DMR se zlepšuje kvalita výsledné koregistrace (Nitti et al. 2011).

Zvolen byl SRTM 1sec, což je globální (do 60° z.š.) DMT se stanovenou, vyčíslenou výškovou chybou a srozišením 30m (1 úhlová sekunda). Je produkovaný Jet propulsion laboratory z interferometrických radarových dat pořizovaných z mise SRTM vedených NASA/NGA (Rodriguez, Morris, Belz 2006). SNAP dále nabízí použití SRTM 3sec, ASTER GDEM, GETASSE30, ACE30 nebo ACE2_5min.

ASTER GDEM nemá v software SNAPu implementovanou výškovou korekci z EGM96 do WGS84 (ESA 2016c) a ostatní DMR nemají srovnatelné prostorové rozlišení.

K převzorkování vedlejšího snímku do rastrové mřížky hlavního snímku, byla zvolena metoda kubické konvoluce, která má z hlediska geometrické přesnosti teoreticky nejbližší transformaci obrazu. Tato transformace se označuje jako funkce $\text{sinc}(x)$ nebo $\sin(x)/x$ (Legg 1994 cit. v Dobrovolný 1998). Při převzorkování dochází k výpočtu a přiřazení nové DN hodnoty vypočtené z původního obrazu.

4.1.3 Filtrace v příčném směru (Range filter)

Software SNAP nabízí ve funkci *Range filtering* k použití tyto parametry:

- *Hamming Alpha* – váha Hammingova apodizačního filtru ve tvaru funkce sinc^2 (nastavení 1 znamená jeho grafickou reprezentaci obdélníkového tvaru). Tato funkce nachází místa spektra, kde se hlavní a vedlejší snímky nepřekrývají. Dle Schwäbische a Geudtnera (1995) byla hodnota nastavena na 0.75.
- *Walking mean window* – počet řad pixelů v obraze, přes které se tento parametr počítá. Tento parametr snižuje šum v odhadovaném vrcholu spektra. Větší číslo zvyšuje přesnost odhadu a výpočetní dobu. Hodnota byla nastavena na 20 (ESA 2016c).
- *Oversampling factor* – překrytí hlavního a vedlejšího snímku tímto faktorem důležitým krokem při vytváření kvalitního interferogramu. Využívá se při něm Nyquistova teorému a rychlé Fourierovy transformace (FFT). Účelem je vyhnout se nekorelovaným příspěvkům, které by se objevily při spektrální korelaci implikované při křížové korelaci (cross – correlation) u funkce *Interferogram formation*. Spektrum interferogramu je pak výsledek křížové korelace spektra obou obrazů. Oversampling faktor zároveň redukuje šum a snižuje zkreslení fázové složky (Gattereri 1994 cit. v Ferretti et al. 2007b). Hodnota faktoru musí nabývat mocniny 2 (ESA 2016c) a dle Ferrettiho et al. (2007b) byla nastavena na 2.

Každý SAR obraz používá svou specifickou *Doppler centroid* frekvenci (f_{DC}) k zlepšení SNR a minimalizaci azimutových nejasností. *Doppler centroid*

frekvence je střední hodnota změny frekvence (f_D), která závisí na orbitální rychlosti družice, úhlu pohledu a úhlu stočení družice (Ferretti et al. 2007b). Filtrace v azimutálním směru (*azimuth filtering*) řeší rozdíl f_{DC} mezi zpracovávanými obrazy (Schwäbisch, Geudtner 1995).

Při pokusu o zapracování azimutální filtrace do metodického postupu byly obdrženy nekvalitní výsledky (ovlivněné softwarem), a proto nakonec nebyla použita.

4.1.4 Vytvoření interferogramu (Interferogram formation)

V programu SNAP lze ve funkci *Interferogram formation* nastavit následující parametry:

- *Number of „Flat Earth“ polynomial* – pro scénu Sentinel – 1 je defaultní nastavení stupně 5. řádu, pro menší scény může být nastaven větší polynomický stupeň a naopak pro větší scény větší polynomický stupeň (ESA 2016c).
- *Number of „Flat Earth“ estimation points* – nastavení počtu bodů k výpočtu referenční fáze metodou nejmenších čtverců. Pro scénu Sentinel – 1 je počet bodů nastaven na 501. Pro větší scénu je potřeba více bodů a naopak pro menší scénu méně (ESA 2016c).
- *Orbit interpolation degree* - nastavení dle počtu stavových vektorů minus 1 (v případě Sentinel-1 jsou uvažovány 4 vektory. Jsou jimi souřadnice x,y,z a oběhová rychlost). V tomto případě byl tedy nastaven stupeň 3. Nedoporučuje se nastavovat jiný než maximální možný stupeň (zároveň nesmí být větší než 5) (ESA 2016c).

4.1.5 Odhad koherence (Coherence estimation)

V software SNAP lze spustit funkci *Coherence estimation* samostatně nebo jako součást funkce *Interferogram formation*. Lze v ní nastavit parametr pohyblivého okna nad obrazem, v kterém se koherence počítá. Lze nastavit v příčném i azimutálním směru zvlášť nebo pro čtvercový pixel pro oba směry stejně. V praktické implementaci byly využity následující hodnoty:

- *Coherence Range window size* – nastaveno na 8
- *Coherence Azimuth window size* – nastaveno na 8

Průměrování přes větší okno má za následek nejen redukci fázového šumu, ale také prostorového rozlišení interferogramu a následně digitálního modelu (Rabus et al. 2002).

4.1.6 S1 TOPSAR – deburst

V této fázi probíhá odstraňování černých linií, které oddělují série pásu (*bursts*), tvořících zpracovávaný snímek (viz kapitola data).

4.1.7 Odstranění referenční fáze (Interferogram flattening)

Pro odstranění referenční fáze jsou v daném software nastavitelné tyto parametry:

- *Orbit interpolation degree* – stejné nastavení jako u *Interferogram formation*.
- *Digital elevation model* – nastaven byl model SRTM 1sec.

4.1.8 Filtrace fáze (Phase filtering)

Software SNAP používá nelineární adaptivní filtrovací algoritmus sestavený R. M. Goldsteinem (Goldstein, Werner 1998), který snižuje podíl šumu ve fázové složce a zlepšuje přesnost měření a také výsledky rozbalení fáze. Funguje na principu přiřazení větších váhových stupňů spektrálním vrcholům interferometrických proužků (Goldstein, Werner 1998).

Interferogram $I(x, y)$ je rozdělen do vzájemně se překrývajících se obdélníkových plošek. Pro každou plošku je spočítáno spektrum $Z(u, v)$. Z něj se následně pomocí exponentu α (adaptive filter exponent) počítá adaptivní filtr $H(u, v)$:

$$H(u, v) = |Z(u, v)|^\alpha$$

- *Adaptive filter exponent* – nabývá hodnot v intervalu $\{0;1\}$. Čím větší je číslo, tím silnější a účinnější je filtrace. Hodnota 1 značí nejsilnější filtraci a nulová hodnota znamená proces bez filtrování. V praxi se jsou použitelné hodnoty v intervalu $[0,2;1]$ (Goldstein, Werner 1998). Pro zpracování byla nastavena hodnota 1.

4.1.9 Rozbalení fáze (Phase unwrapping)

Software SNAP nabízí export zabalené fáze do souboru určeného k rozbalení ve volně dostupném algoritmu SNAPHU (*Snaphu Export*):

- *Statistical-cost mode* nabízí statistické modely podle typu dat: TOPO pro výpočet topografie a DEFO pro výpočet deformací.
- *Initial method* nabízí dvě statistické metody výpočtu: MCF (minimum cost flow), MST (minimum spanning tree). Pro potřeby tvorby DMP byl použit algoritmus MCF (ESA 2016c).

Samotné rozbalení probíhá pouze v operačním systému Linux a je aplikováno přes příkazový řádek pomocí dat exportovaných ze SNAP.

Po rozbalení fáze je nutné ji znovu importovat (*Snaphu Import*) do původních dat a dále je možné s nimi pracovat znovu ve SNAP.

Algoritmus SNAPHU je implementací statistické metody *Network-flow algorithm* (Chen, Zebker 2000). Tento algoritmus se snaží o co nejpravděpodobnější řešení rozbalení fáze vzhledem ke vstupním datům. Proto nabízí výpočet podle tří

statistických modelů na základě typu vstupních dat: pro topografická data, pro výpočet deformací a pro obecná vyhlazená data. Výpočetní doba a náročnost na výpočetní paměť jsou z důvodu optimalizace výsledku pomocí iteračních výpočtů náročné. Snapu vždy produkuje kompletní rozbalení fáze a jeho výsledky jsou buď lepší, nebo srovnatelné s jinými algoritmy pro rozbalení fáze (Stanford University 2003).

4.1.10 Transformace fáze na výšku (DEM generation)

V software SNAP můžeme ve funkci *Phase to elevation (DEM generation)*, která převádí interferometrickou fázi na DMP, nastavit tyto parametry:

- *Digital elevation model*, který udává DMR použitý jako referenční pro výpočet výšek. Použit byl model SRTM 1sec, přičemž další vhodnou variantou může být vlastní externí DMR.
- *DEM resampling method* udávající metodu převzorkování použitou pro získání DMR. Byla použita metoda kubické konvoluce.

4.1.11 Terénní korekce

V software SNAP řeší terénní korekce funkce *Range-Doppler terrain correction*. Bylo pracováno s následujícími parametry:

- *Digital elevation model*, tedy vztažený DMR. Nastaven byl model SRTM 1sec.
- *DEM resampling method* byla nastavena na kubickou konvoluci.
- *Map projection* – použita projekce WGS84
- *Pixel spacing* – určuje velikost výsledného pixelu. Crosetto (2002) doporučuje komprimovat prostorové rozlišení výsledného DMR čtyřnásobně ve směru azimutu. Stejný postup zavádí Wegmüller et al. (2009). Vzhledem k pohyblivému rozlišení zpracovávaných scén ve směru azimutu od hodnot 3,53m do 3,92m byla hodnota pixel spacing nastavena na 15m.

Použitím terénních korekcí je zároveň vyřešeno zrcadlové otočení sestupných snímků.

4.2 Transformace mezi výškovými systémy

4.2.1 Výškový systém Bpv

V Evropě se v současnosti používají dvě nivelační sítě UELN a UPLN. Tyto nivelační sítě definují dva výškové systémy. Síť UELN definuje Amsterodamský a síť UPLN Baltský výškový systém (Šimek, Kostelecký 2000).

UPLN se skládá z linií prvního řádu, procházejících skrz Bulharsko, Českou republiku, Východní Německo, Polsko, Slovensko, Maďarsko, Bělorusko, Estonsko,

Lotyšsko, Litvu, Ukrajinu, Moldavsko, Rumunsko, Rusko a Gruzii. V České republice se výškový systém nazývá Bpv – Balt po vyrovnání a je závazný na celém území státu. Je definovaný výchozím výškovým bodem v Kronštadu (Rusko) na pobřeží Baltského moře a souborem normálních výšek z mezinárodního vyrovnání nivelačních sítí (Šimek, Kostecký 2000).

4.2.2 Výškový systém ETRS89

ETRS89 je Evropský terestrický referenční systém, ve kterém je hybnost Euroasijské desky neměnná. Vychází z globálních geodetických údajů ITRS, jejichž reprezentace kontinentálních posunů je vybalancován tak, aby se celková hybnost pohybovala kolem nuly. Je definován na elipsoidu GRS80 (EUREF 2011).

4.2.3 Transformace mezi ETRS89 a Bpv

Získaný DMP obsahuje elipsoidické výšky vztažené k elipsoidu GRS80. Transformace těchto elipsoidických výšek na výšky nadmořské v závazném systému Bpv se používá model kvazigeoidu CR-2005 (Kostecký, Kostecký, Pešek 2010).

Pro každý bod (pixel) v extrahovaném DMP (získaném ve výškovém systému ETRS89) byla převodem do bodové vrstvy vypočtena přesná informace o výšce a souřadnicích (B, L, H). Tato data byla transformována pomocí WCTS služby, která využívá model ETJ TZU 2013 (schválený ČÚZK pro transformaci z ETRS89 do Bpv) do Bpv (Y, X, H_{Bpv}). Ten provádí 3D transformaci, a proto je nutné znát zeměpisnou délku, šířku a nadmořskou výšku každého transformovaného bodu (ČÚZK 2013). Získané nadmořské výšky byly následně přiřazeny extrahovanému DMP. Rozdíl mezi výškovými systémy ETRS89 a Bpv se u všech území pohyboval nad hranicí 40 m. Hodnoty maximálního a minimálního rozdílu v celém území se lišily v řádu desetin metru. Ukázka rozdílových hodnot pro jeden bod z každého zpracovaného území je znázorněna v Tab. 6.

	z.š. [°]	z.d. [°]	ETRS89 - Bpv[m]
PRAH_70	50.10402	14.40753	44,867
BRAN_00	50.33197	14.95431	44,006
ZACL_81	50.73106	15.65984	43,723

Tab. 6 Rozdíl mezi výškovými systémy ETRS89 a Bpv

4.3 Hodnocení přesnosti statistickými metodami

Během vytváření DMP vznikají chyby z důvodu zašumění snímku, geometrie SAR, atmosférických vlivů, nepřesností při koregistraci, rozbalení fáze a dalšími. Jak píše (Höhle, Höhle 2009), vzniklé chyby můžeme detekovat a analyzovat pomocí statistických metod.

K validaci extrahovaného DMP je důležité mít k dispozici dostatečné množství přesných dat. V případě této práce je k dispozici DMP 1G, který umožňuje vypočít

výškový rozdíl (výškovou chybu extrahovaného DMP) pro každý pixel a statistické chyby na vzorku celého DMP.

K hodnocení statistickými metodami byly dle (Höhle, Höhle 2009) zvoleny tyto veličiny:

- Střední kvadratická chyba (*RMSE*)
- Průměr (*Mean*)
- Medián (*Median*)
- Směrodatná odchylka (*Standard Deviation*)
- Střední kvadratická chyba (po odstranění odlehlých hodnot)
- Průměr (po odstranění odlehlých hodnot)
- Směrodatná odchylka (po odstranění odlehlých hodnot)

Odlehlými hodnotami se rozumí 2,5% minimálních a 2,5% maximálních hodnot, je tedy počítáno na 95 % intervalu hodnot získaných nadmořských výšek v histogramu hodnoceného DMP.

Zároveň byly spočítány odchylky extrahovaného DMP od referenčního DMP 1G (výškové chyby) pro každý pixel obrazu a z nich byly určeny průměrné a maximální hodnoty. To bylo provedeno jak pro celý vzorek, tak pro interval 95% jako u předchozích případů.

5 Výsledky a hodnocení

V této kapitole jsou představeny výsledky, kterých bylo dosaženo za použití zvoleného metodického postupu radarové interferometrie a testováním statistickými metodami.

5.1 Výběr polarizace

Jelikož použitá data obsahovala dva typy polarizace (VV a VH) a při koregistraci je možné pracovat již jen s jednou z nich, byly v prvním kroku porovnány získané hodnoty koherence pro obě dostupné polarizace. Z těchto hodnot bylo odvozeno, která z polarizací je vhodnější k další aplikaci. Testování proběhlo na dvojicích snímků 02/01/16 + 26/01/16 (výstupná orbita, neobsahuje testovanou lokalitu ZACL_81), 27/11/15 + 21/12/15 (výstupná orbita) a 06/01/16 + 30/01/16 (sestupná orbita, neobsahuje testovanou lokalitu PRAH_70).

Na základě srovnání získaných hodnot (Tab. 7) bylo zjištěno, že polarizace VV dosahuje oproti polarizaci VH lepších výsledků hodnot koherence u všech testovaných typů území a pro oba typy orbit. Proto byla použita u zpracování všech použitých dvojic snímků.

		BRAN_10			PRAH_70			ZACL_82		
		min	max	mean	min	max	mean	min	max	mean
02/01+26/01	VV	0,0484	0,9900	0,4638	0,0557	0,9783	0,5648	x	x	x
	VH	0,0068	0,9206	0,2463	0,0324	0,9311	0,4147	x	x	x
27/11+21/12	VV	0,0143	0,9924	0,4411	0,0542	0,9829	0,5848	0,0207	0,7470	0,1719
	VH	0,0082	0,9036	0,2514	0,0286	0,9385	0,4022	0,0219	0,7654	0,1498
06/01+30/01	VV	0,0566	0,9892	0,4564	x	x	x	0,0401	0,7287	0,2624
	VH	0,0079	0,9119	0,2547	x	x	x	0,0070	0,8727	0,1627

Tab. 7 Srovnání koherence jednotlivých polarizací

5.2 Hodnocení koherence

Dohromady bylo vyhotoveno šest interferogramů z dvojic snímků v intervalu pořízení 24 dní pro celé scény. Pro vzájemně se překrývající části scén byly zpracovány dvě dvojice snímků s časovou základnou 12 dní. Některé zpracované scény v sobě neobsahovaly všechny tři testované lokality (vždy obsahovaly minimálně dvě – lokalita BRAN_00 byla obsažena ve všech scénách). Dvojice s časovou základnou 12 dní pokrývaly svým rozsahem vždy pouze dvě lokality. V rámci testování byl vyhotoven interferogram ze scén s časovou základnou dlouhou 48 dní:

- Sestupná orbita:
 - 13/12/15 + 06/01/16
 - 06/01/16 + 30/01/16
 - 30/01/16 + 23/02/16
 - 11/02/16 + 23/02/16
- Výstupná orbita:
 - 27/11/15 + 21/12/15
 - 09/12/15 + 21/12/15
 - 09/12/15 + 26/01/16
 - 21/12/15 + 14/01/16
 - 02/01/16 + 26/01/16

U všech zpracovaných koregistrovaných dvojic bylo provedeno hodnocení získané koherentní mapy. V prvním kroku byla spočítána průměrná koherence (Tab. 8) a její směrodatná odchylka (Tab. 9) pro všechna testovaná území.

	Průměrná koherence		
	BRAN_00	PRAH_70	ZACL_81
13/12/15 + 06/01/16	0,4251	x	0,1612
06/01/16 + 30/01/16	0,4564	x	0,2624
30/01/16 + 23/02/16	0,4127	0,5047	x
11/02/16 + 23/02/16	0,4015	0,5129	x
27/11/15 + 21/12/15	0,4411	0,5848	0,1719
09/12/15 + 21/12/15	0,4274	0,5063	x
09/12/15 + 26/01/16	0,3688	0,4732	x
21/12/15 + 14/01/16	0,4032	0,4936	0,1597
02/01/16 + 26/01/16	0,4638	0,5648	x

Tab. 8 Průměrná koherence u vyhotovených interferogramů

	Směrodatná odchylka koherence		
	BRAN_00	PRAH_00	ZACL_82
13/12/15 + 06/01/16	0,1911	x	0,0714
06/01/16 + 30/01/16	0,1681	x	0,0992
30/01/16 + 23/02/16	0,1729	0,2549	x
11/02/16 + 23/02/16	0,1795	0,2521	x
27/11/15 + 21/12/15	0,1995	0,2258	0,0784
09/12/15 + 21/12/15	0,1624	0,2487	x
09/12/15 + 26/01/16	0,2058	0,2611	x
21/12/15 + 14/01/16	0,1803	0,2316	0,0681
02/01/16 + 26/01/16	0,1844	0,2123	x

Tab. 9 Směrodatná odchylka koherence u vyhotovených interferogramů

Nejlepších výsledků dosahovala lokalita PRAH_70 díky největší ploše zastavěného území a nejhorších výsledků lokalita ZACL_81 jejíž interferogramy

obsahovaly z větší části šum. Na základě získaných hodnot byly pro jednotlivá území zvoleny tyto dvojice snímků s nejlepšími výsledky:

- BRAN_00:
 - 27/11/15 + 21/12/15
 - 02/01/16 + 26/01/16
 - 06/01/16 + 30/01/16
- PRAH_70:
 - 27/11/15 + 21/12/15
 - 02/01/16 + 26/01/16
 - 11/02/16 + 23/02/16
- ZACL_81:
 - 27/11/15 + 21/12/15
 - 06/01/16 + 30/01/16

V případě území BRAN_00 byly výsledky průměrovány ze tří koregistrovaných dvojic snímků, přičemž byly použity dvojice snímků s výstupnými i sestupnými orbitálními drahami.

V lokalitě PRAH_70 byly vytvořeny dva DMP. V prvním případě byly použity tři dvojice snímků (s kombinací sestupných a výstupných drah) a v druhém případě dvě dvojice bez kombinace sestupných a výstupných drah (viz kapitola 5.2).

V případě území ZACL_81 byl digitální model terénu vyhotoven kvůli nedostatku vhodných dat pouze z jednoho interferogramu. Aby i v tomto případě bylo pracováno s kombinací sestupných a výstupných orbitálních drah, byla pro srovnání vytvořena v této lokalitě také varianta DMP v kombinaci obou orbitálních snímání. V případě kombinovaného DMP se předpokládal kvůli nízké koherenci horší výsledek než u nekombinovaného DMP.

Možnost vytvoření DMP z více dvojic snímků byla zvolena, aby byly vyhlazeny extrémní hodnoty (chyby), které jsou u DMP vytvořených pouze z jedné dvojice dat Sentinel-1 časté.

Všechny získané DMP byly v dalším postupu hodnoceny statistickými metodami.

Koregistrované dvojice s časovou základnou 12 dní neměly oproti předpokladu v testovaných případech lepší výsledky než dvojice s časovou základnou 24 dní, a proto nebyly použity. Jediná dvojice s časovou základnou 48 dní měla nejhorší výsledky a byla také vyřazena.

Pro zvolené dvojice bylo provedeno komplexnější hodnocení koherence. V prvním kroku bylo spočítáno procentuální rozložení koherence v rozmezí hodnot 0 – 0,2; 0,2001 – 0,4; 0,4001 – 0,6; 0,6001 – 0,8 a 0,8001 – 1.

Tím bylo zjištěno, že v lokalitě BRAN_00 mají všechny testované dvojice snímků podobnou kvalitu koherence. Nejqualitnějšími hodnotami zde ale disponuje dvojice 06/01/16 + 30/01/16, která má nejmenší procentuální podíl hodnot v rozmezí 0 – 0,2, největší v intervalu 0,4001 – 0,6 a v ostatních intervalech je srovnatelná s ostatními (Tab. 10). V lokalitě PRAH_70 měla nejqualitnější koherenci dvojice 21/11/15 + 21/12/15, která měla z hodnocených dvojic největší podíl u nejvyšších hodnot koherence (interval 0,8001 – 1). Nejhorší, ale stále kvalitní výsledky zde měla dvojice 11/02/16 + 23/02/16, která měla z hodnocených dvojic největší podíl u nejhorších hodnot koherence v rozmezí 0 – 0,2 (Tab. 11). V území ZACL_81 se potvrdily nízké hodnoty koherence a špatná kvalita koherence u dvojice 27/11/15 + 21/12/15, která nakonec nebyla v hodnoceném DMP z tohoto území použita. V této lokalitě se nenacházejí žádné hodnoty koherence nad 0,8001 a téměř žádné nad 0,6001 (Tab. 12).

	Podíl koherence [%]				
	0 - 0,2	0,2001 - 0,4	0,4001 - 0,6	0,6001 - 0,8	0,8001 - 1
2711_2112	13,17	30,97	31,92	20,92	3,03
0201_2601	9,13	32,73	33,41	22,83	1,90
0601_3001	4,88	33,11	38,93	21,34	1,75

Tab. 10 Podíl koherence BRAN_00

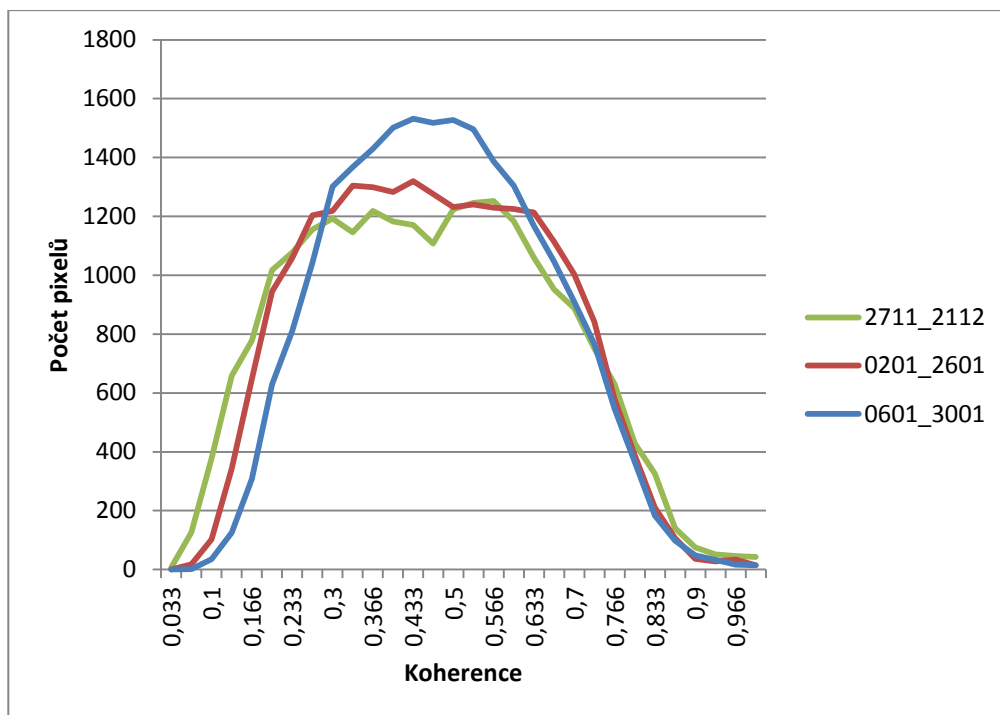
	Podíl koherence [%]				
	0 - 0,2	0,2001 - 0,4	0,4001 - 0,6	0,6001 - 0,8	0,8001 - 1
2711_2112	5,10	19,77	23,67	30,22	21,24
0201_2601	4,48	20,81	27,23	32,30	15,19
1102_2302	15,34	18,71	20,20	32,19	13,57

Tab. 11 Podíl koherence PRAH_70

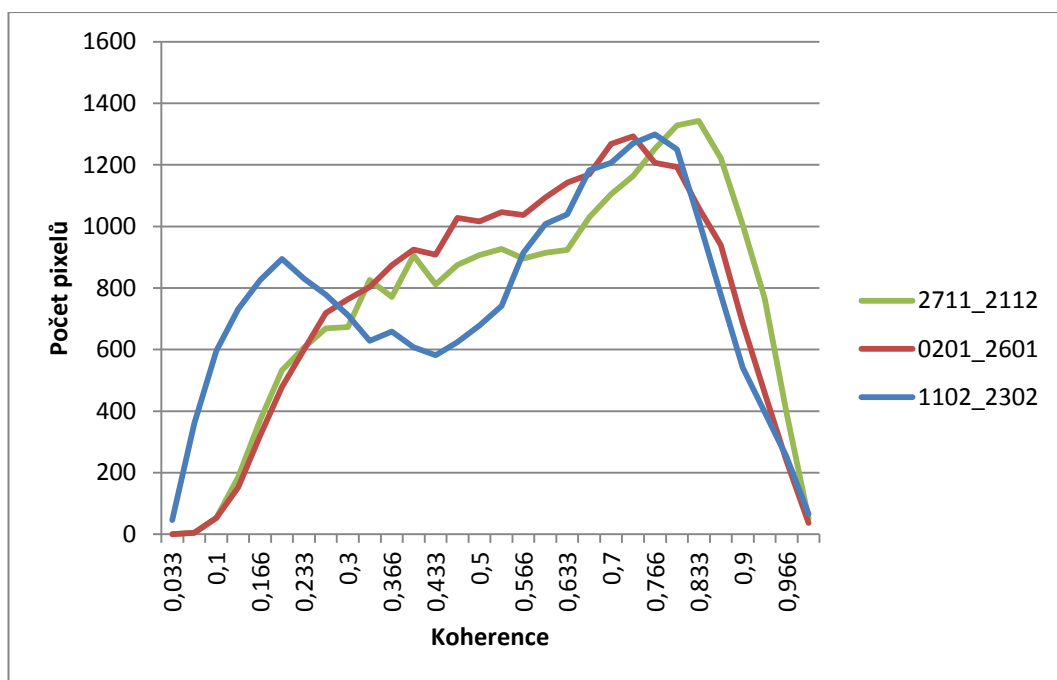
	Podíl koherence [%]				
	0 - 0,2	0,2001 - 0,4	0,4001 - 0,6	0,6001 - 0,8	0,8001 - 1
2711_2112	67,38	31,77	0,80	0,05	0,00
0601_3001	29,58	60,79	9,49	0,14	0,00

Tab. 12 Podíl koherence ZACL_81

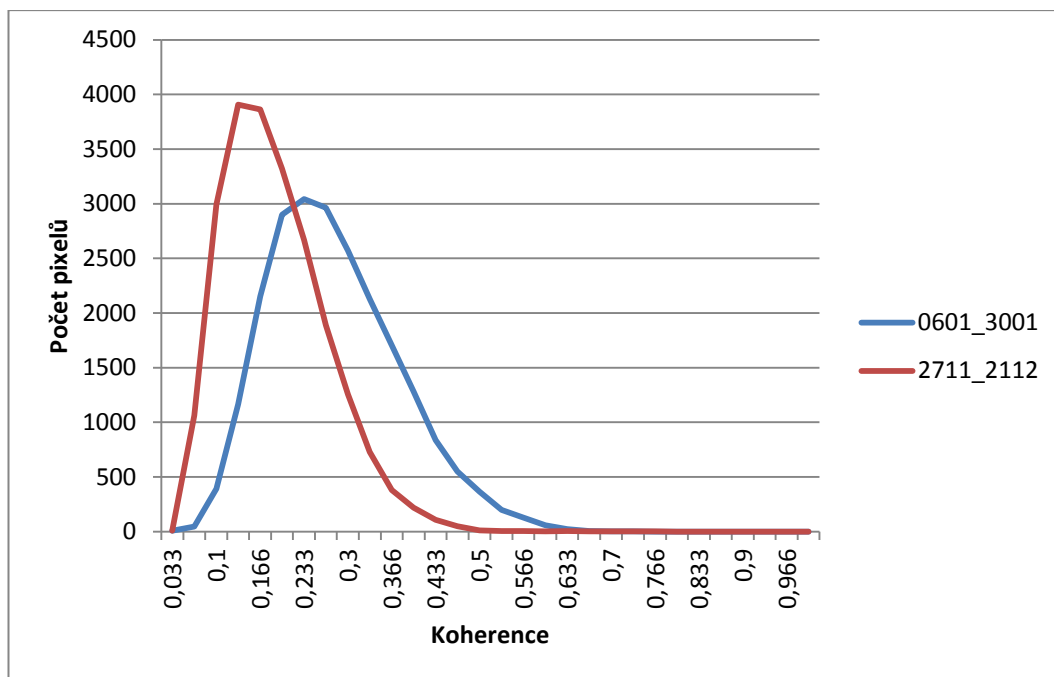
V dalším kroku byly sestaveny histogramy rozložení hodnot koherence v každé použité dvojici snímků. Byly zde znázorněny počty pixelů v závislosti na jejich vypočtené koherenci. Histogramy byly vyneseny do tří grafů, přičemž každý z nich reprezentoval jednu testovanou lokalitu (Obr. 13, Obr. 14 a Obr. 15). Vizuálně zde byly potvrzeny závěry učiněné v předchozím kroku. V lokalitě BRAN_00 je nejqualitnější dvojice 06/01/16 + 30/01/16, v lokalitě PRAH_70 je to dvojice 27/11/15 + 21/12/15 a u území ZACL_81 byla jedinou použitelnou dvojicí 06/01/16 + 30/01/16.



Obr. 13 Histogram koherence BRAN_00



Obr. 14 Histogram koherence PRAH_70



Obr. 15 Histogram coherence ZACL_81

Následoval výpočet průměrné koherence a její směrodatné odchylky pro všechny obsažené typy krajinného pokryvu ve všech vybraných koregistrovaných scénách (Tab. 13 a Tab. 14).

Nejlepších hodnot koherence dosáhla ve všech případech městská zástavba. Na hodnotách směrodatné odchylky můžeme pozorovat relativně velký rozptyl hodnot právě u městské zástavby. Směrodatná odchylka u lesních porostů v lokalitě BRAN_00 ukazuje malý rozptyl hodnot, což je způsobeno absencí vysokých hodnot koherence (tento efekt můžeme také pozorovat u všech spočítaných hodnot a krajinných typů v lokalitě ZACL_81, kde se vyšší hodnoty koherence vůbec nevyskytují).

Koherence třídy *holá půdy + travní porosty* v lokalitě BRAN_00 je ve všech případech vyšší než v lokalitě PRAH_70, což může být způsobeno odlišným typem využití těchto ploch (BRAN_00 – orná půda, PRAH_70 – zatravněné plochy), případně příměsí malých skupin stromů v lokalitě PRAH_70. Ty se v lokalitě BRAN_00 vůbec nevyskytují. Nižší hustota lesního krytu (s příměsemi holé půdy – lesopark Stromovka) v lokalitě PRAH_70, může mít za následek vyšší hodnoty koherence třídy *Lesní porosty* ve srovnání s ostatními lokalitami.

	Průměrná koherence			
	Městská zástavba	Holá půda + travní porosty	Lesní porosty	Vodní plochy
BRAN_00 27/11 + 21/12	0,6167	0,4323	0,3033	x
BRAN_00 02/01 + 26/01	0,5805	0,4463	0,3192	x
BRAN_00 06/01 + 30/01	0,6232	0,4558	0,3831	x
PRAH_70 27/11 + 21/12	0,6787	0,3672	0,4046	0,3648
PRAH_70 26/01 + 02/01	0,6450	0,3884	0,4040	0,3699
PRAH_70 11/02 + 23/02	0,6338	0,3853	0,3082	0,2901
ZACL_81 27/11 + 21/12	x	0,1669	0,1753	x
ZACL_81 06/01 + 30/01	x	0,2631	0,2619	x

Tab. 13 Hodnoty koherence v závislosti na krajinném pokryvu

	Směrodatná odchylka koherence			
	Městská zástavba	Holá půda+ travní porosty	Lesní porosty	Vodní plochy
BRAN_00 27/11 + 21/12	0,2031	0,1939	0,1371	x
BRAN_00 02/01 + 26/01	0,1872	0,1811	0,1278	x
BRAN_00 06/01 + 30/01	0,1730	0,1627	0,1397	x
PRAH_70 27/11 + 21/12	0,1817	0,1674	0,1724	0,1539
PRAH_70 26/01 + 02/01	0,1787	0,1657	0,1748	0,1604
PRAH_70 11/02 + 23/02	0,1867	0,1922	0,1981	0,1780
ZACL_81 27/11 + 21/12	x	0,0736	0,0799	x
ZACL_81 06/01 + 30/01	x	0,0991	0,0986	x

Tab. 14 Směrodatná odchylka koherence u jednotlivých typů krajinného pokryvu

Na základě těchto výsledků bylo rozhodnuto testovat v lokalitě PRAH_70 také variantu vytvoření DMP bez použití dvojice snímků 11/02/16 + 23/02/16, která se ve srovnání s ostatními dvojicemi jevila svými hodnotami koherence jako nejméně kvalitní. Tím byla zanedbána jediná dvojice ze sestupné orbity. V této lokalitě se nevyskytují svahy orientované přímo na západ, které se zkrslují na snímcích z výstupných drah. Díky tomu byl z důvodu tohoto zanedbání stanoven předpoklad menší chyby, než z důvodu použití dvojice s horšími hodnotami koherence.

5.3 Hodnocení extrahovaných DMP

Vzhledem k různé kvalitě interferogram hodnocených mírou koherence v kapitole 5.2, bylo metodickým postupem popsáním v kapitole 4 nakonec vytvořeno pět digitálních modelů povrchu, a to jeden v lokalitě BRAN_00 a dva DMP v lokalitách PRAH_70 a ZACL_81. U těchto vytvořených digitálních modelů a u vztažných DMP 1G porízeného z dat leteckého laserového skenování byly vypočteny tyto statistické veličiny:

- Průměr
- Medián
- Směrodatná odchylka
- Minimum a maximum

Následně proběhlo odečtení extrahovaných modelů od modelů vztažných a byly zjištěny tyto veličiny:

- Střední kvadratická chyba (*RMSE*)
- Průměrná chyba
- Maximální chyba

V poslední řadě byly výše zmíněné veličiny (kromě mediánu, minima a maxima) počítány na intervalu 95%, aby byly zanedbány odlehlé hodnoty.

Hodnocení výšek je zaznamenáno v Tab. 15, Tab. 17 a Tab. 19. Hodnocení chyb vytvořených DMP pak v Tab. 16, Tab. 18 a Tab. 20. V těchto tabulkách je v případě lokality PRAH_70 je DMP vytvořený z kombinace dvou dvojic snímků označen jako S1 a DMP vytvořený ze tří dvojic (sestupné i výstupné orbity) označen jako S1(2). V případě ZACL_81 je DMP vytvořený z jedné dvojice snímků označený jako S1 a DMP vytvořený ze dvou dvojic snímků (sestupné i výstupné dráhy) jako S1(2). Důležitým aspektem bylo také vizuální porovnání a zhodnocení průběhu reliéfu extrahovaných DMP se vztažnými modely.

BRAN_00	DMP 1G	S1
Průměr [m]	213,40	211,93
Medián [m]	212,25	210,15
Směrodatná odchylka	5,11	11,02
Minimum [m]	205,06	181,78
Maximum [m]	240,07	236,86
Průměr [m] 95%	213,16	211,86
Směrodatná odchylka 95%	4,44	10,08

Tab. 15 Hodnocení výšek DMP v lokalitě BRAN_00

BRAN_00	S1
RMSE [m]	15,33
Směrodatná odchylka	7,89
Průměrná chyba [m]	14,51
Maximální chyba[m]	49,92
RMSE [m] 95%	16,15
Směrodatná odchylka 95%	6,96
Průměrná chyba [m] 95%	14,18
Maximální chyba[m] 95%	28,90

Tab. 16 Hodnocení výškových chyb v lokalitě BRAN_00

PRAH_70	DMP 1G	S1	S1 (2)
Průměr [m]	216,14	207,85	207,94
Medián [m]	219,70	211,58	213,70
Směrodatná odchylka	21,60	19,79	28,16
Minimum [m]	175,57	161,83	23,46
Maximum [m]	284,64	260,68	315,35
Průměr [m] 95%	215,92	207,78	209,05
Směrodatná odchylka 95%	19,94	18,45	22,72

Tab. 17 Hodnocení výšek DMP v lokalitě PRAH_70

PRAH_70	S1	S1 (2)
RMSE [m]	12,65	22,85
Směrodatná odchylka	7,81	16,46
Průměrná chyba [m]	11,95	15,84
Maximální chyba[m]	61,02	182,57
RMSE [m] 95%	11,91	18,84
Směrodatná odchylka 95%	7,00	12,07
Průměrná chyba [m] 95%	11,64	14,47
Maximální chyba[m] 95%	27,42	63,41

Tab. 18 Hodnocení výškových chyb v lokalitě PRAH_70

ZACL_81	DMP 1G	S1	S1 (2)
Průměr [m]	1234,74	1344,97	1530,90
Medián [m]	1249,42	1354,03	1522,02
Směrodatná odchylka	159,55	121,05	193,30
Minimum [m]	852,08	910,54	1042,73
Maximum [m]	1546,37	1681,44	2135,85
Průměr [m] 95%	1236,03	1346,82	1528,18
Směrodatná odchylka 95%	146,79	119,57	173,61

Tab. 19 Hodnocení výšek DMP v lokalitě ZACL_8

ZACL_81	S1	S1 (2)
RMSE [m]	162,18	415,87
Směrodatná odchylka	94,19	230,70
Průměrná chyba [m]	132,02	346,02
Maximální chyba[m]	201,72	938,03
RMSE [m] 95%	150,62	400,88
Směrodatná odchylka 95%	83,35	215,70
Průměrná chyba [m] 95%	128,31	342,21
Maximální chyba[m] 95%	362,65	793,70

Tab. 20 Hodnocení výškových chyb v lokalitě ZACL_81

Z vypočtených hodnot je patrné, že byly potvrzeny předpoklady z kapitol 5.1 a 5.2. Digitální modely povrchu vytvořené v lokalitách PRAH_70 a ZACL_81 z dvojic s kombinací sestupných a výstupných orbitálních drah za cenu použití dvojic s horší koherencí dosahovaly horších výsledků než modely vytvořené pouze z dvojic s kvalitnějšími hodnotami koherence, ale bez kombinace orbitálních drah.

Nejlepšího statistického hodnocení dosahoval první DMP v lokalitě PRAH_70 (Tab. 18). U tohoto DMP se s průměrnou výškovou chybou 11,95 m a střední kvadratickou chybou 12,65 m dá hovořit o relativně kvalitním výstupu. V případě generování vrstevnic s ekvidistancí 10 m by tento výsledek kalkuloval s chybou pouze jedné vrstevnice. Při srovnání mapových výstupů DMP 1G a extrahovaného DMP v této lokalitě (Příloha 5, Příloha 6 a Příloha 8) lze navíc vyzorovat stejný nebo velice podobný průběh terénu.

Při srovnání obou extrahovaných DMP v lokalitě PRAH_70 byl spočítán rozdíl v průměrné chybě téměř 4 m a ve střední kvadratické chybě přes 10 m. V případě druhého DMP se vyskytuje mnohem větší maximální chyba (o 100 m větší než v prvním případě). Na intervalu 95% hodnot se jeho kvalita markantně zlepšila (RMSE o 4 m a průměrná chyba o 1,5 m), ale stále nedosahuje kvalit prvního DMP. Průměrná výška a medián druhého DMP jsou více podobné vztažnému DMP 1G než průměrná výška a medián prvního DMP. Směrodatná odchylka hodnot u prvního

DMP je naopak mnohem bližší vztažnému modelu než v případě druhého DMP. Ze směrodatné odchylky (rozptylu hodnot) a malých změn u většiny statistických veličin po zanedbání odlehlých hodnot lze usoudit, že první DMP neobsahuje mnoho velkých chyb. Oproti tomu v druhém DMP se vyskytuje více pixelů s vysokou výškovou chybou.

DMP vytvořený v lokalitě BRAN_00 vykazuje druhé nejlepší výsledky (Tab. 16). Průměrná výšky a její medián se blíží vztažnému DMP 1G na výšku 1,5 – 2 m, což je lepší výsledek než u DMP v lokalitě PRAH_70. To může být způsobeno menším rozptylem výšek v lokalitě BRAN_00 a také menšími extrémními chybami. Při pohledu na průměrnou chybu a střední kvadratickou chybu už ale dosahuje horších výsledků. Ovšem chyba kolem 15 m značí stále relativně dobrý a použitelný model. Při porovnání map DMP 1G a extrahovaného modelu (Příloha 2 a Příloha 3) je patrné, že v některých částech je průběh terénu podobný, ale některé terénní tvary se vzájemně příliš neshodují. Při počítání na intervalu 95% se znovu statistické výsledky zlepšují, případně přibližují vztažnému modelu.

Nejhoršími výsledky se prezentuje lokalita ZACL_81 (Tab. 20). Zde se průměrná chyba oproti vztažnému DMP 1G vyšplhala až na 132 m a střední kvadratická chyba na 162 m, což značí nekvalitní a k dalším aplikacím prakticky nepoužitelný DMP. Odlehlé hodnoty nabývaly větších extrémů než u předchozích lokalit, protože jejich zanedbání mělo za následek větší změny, ale chyby nabývaly stále velkých hodnot (průměrná chyba 128 m a maximální chyba přes 360 m). V případě DMP kombinovaného ze dvou dvojic snímků se nepodařilo vytvořit DMP, který by měl jakoukoliv vypovídající hodnotu (průměrná chyba 346 m a střední kvadratická chyba 415 m). Při vizuálním srovnání jejich mapových výstupů (Příloha 10, Příloha 11 a Příloha 13) je patrné, že první DMP minimálním způsobem kopíruje hlavní údolí a hřbet (s ostrůvky lokálních nepřesností), ale druhý DMP neobsahuje žádné společné znaky reliéfu.

Na základě tohoto hodnocení je při použití stanoveného metodického postupu a hlavně dostupnosti dostatečného množství kvalitních dat předpokládána chyba digitálních modelů povrchu z dat Sentinel-1 10 – 20 m. S ohledem na průměrnou chybu je očekáván systematický posun, který může být způsoben změnami odrazivosti (Loew, Mauser 2007) nebo heterogenitami v atmosféře (Crosetto 2002) vzniklými v době mezi pořízením dvojice snímků.

6 Diskuze

V kapitole 5.3 bylo na základě validace digitálním modelem DMP 1G statisticky hodnoceno a popsáno pět digitálních modelů povrchu, vytvořených ve třech různých lokalitách a z různých kombinací dvojic radarových snímků Sentinel-1. Vizualně byl zhodnocen průběh terénu.

Tvorbě a hodnocení DMP předcházela výběr polarizace. V kapitole 5.1 bylo provedeno srovnání průměrných hodnot koherence obou dostupných typů polarizace. Na základě tohoto srovnání byla pro další zpracování vybrána polarizace VV, která dosahovala téměř ve všech případech lepších hodnot. Tento fakt může být z hlediska nemožnosti výběru polarizace v některých částech světa pozitivní. Pokud jsou poskytována data Sentinel-1 pouze s jednou polarizací (*single polarization*) jedná se o polarizaci VV (střední Asie, západní části Jižní a Severní Ameriky) nebo HH (Grónsko, části Antarktidy), tedy nikdy VH (Obr. 8). U polarizace HH by ovšem bylo nutné provést podobné hodnocení koherence, aby se také mohlo mluvit o výhodě.

Jednotlivé modely se na základě statistického hodnocení ukázaly jako různě kvalitní a vykazovaly různé hodnoty výškových chyb. Rozdílná kvalita může být způsobena několika důvody. První z nich může být rozdílná úroveň koregistrace, kdy se může její kvalita lišit území od území. Jistý vliv mohou mít také atmosférické vlivy nebo sněhové změny. Interferogramy ovlivněné těmito vlivy však byly s největší pravděpodobností vyřazeny při hodnocení koherence. S jistotou se dá říci, že velký vliv má složení krajinného pokryvu v dané lokalitě. Lesní porosty jsou při snímání v pásmu C typické svými nízkými hodnotami koherence kvůli své nestabilní geometrii dané temporální dekorelací a velkému objemu odrazů (Klenke, Hochschild 1999). Povrch městské zástavby je naopak velmi stabilní a nepodléhá časové dekorelaci, proto zde bývají hodnoty koherence vyšší (Schneider et. al 2005). Tyto předpoklady byly úspěšně ověřeny v kapitole 5.2 (Tab. 13).

Nejlepších výsledků tedy dosahuje DMP vytvořený v lokalitě PRAH_70 s nejvyšší hustotou intravilánu. K velmi přesnému DMP, který by vyjadřoval přesný průběh intravilánu má ovšem obdržený výsledek daleko. Lokalita ZACL_81 je z hlediska krajinného složení nejvíce zalesněna. Z výše uvedených důvodů byly pak interferogramy vytvořené v této lokalitě z velké části zašuměné a hodnoty koherence byly nízké.

Hodnocení přesnosti DMP z dat Sentinel-1 provedli ve své studii Nikolakopoulos a Kyriou (2015) na území řeckých ostrovů Mykonos a Lesbos.

Vytvořený DMP byl porovnán s různými digitálními modely terénu (Aster GDEM, SRTM 3sec, ALOS PRISM, řecký katastrální digitální model povrchu, DMP vytvořený z vrstevnic topografických map), ale také s pozemním měřením (GCP). Ostrov Mykonos má rozlohu 86 km² a rozdíl mezi maximální a minimální nadmořskou výškou 364 m. Průměrná chyba modelu z dat Sentinel-1 zde byla 19,48 m. Ostrov Lesbos má rozlohu 1630 km² a převýšení přes 900 m a průměrná chyba zde byla 28,00 m. Ostrov Lesbos zároveň vykazuje větší plochy vegetačního pokryvu než ostrov Mykonos a zřejmě tedy horší hodnoty koherence, což nebylo v této studii hodnoceno. Z hlediska průměrné chyby bylo v této práci v lokalitách PRAH_70 a BRAN_00 dosaženo lepších výsledků, ale to bylo způsobeno hodnocením mnohem menších území s menším převýšením a tedy menší možností výskytu velkých chyb.

Z výsledných DMP v této práci se dá usuzovat, že koregistrované dvojice, disponující průměrnými hodnotami koherence menšími než 0,4 generují špatné výsledky. Dvojice s průměrnými hodnotami koherence menšími než 0,2 pak obsahují příliš mnoho šumu a výsledky nemohou být použity k dalším aplikacím. Pro získání kvalitnějšího DMP by bylo potřeba provést větší množství měření a zkusit získat méně zašuměné interferogramy obsahující více signálu a informace.

Zajímavé a přínosné by mohlo být testování území, kde se průměrná koherence pohybuje minimálně kolem hodnoty 0,8. Způsob, kterým by takové hodnoty v budoucnu mohly být získány na dostatečně velkém území, by mohlo být zpracování kombinace dat z obou satelitů Sentinel-1 s nejkratší možnou časovou základnou tři dny (jen pro některé oblasti, běžně šest dní). To bude možné, až budou k dispozici husté časové řady i ze satelitu Sentinel-1B. V této práci byly zpracovány pouze dvojice ze satelitu Sentinel-1A s časovou základnou 12, 24 a 48 dní. Na malém vzorku nebylo prokázáno zlepšení koherence u vstupních dat s kratší časovou základnou oproti dvojicím s delšími časovými základnami. Její zkrácení na tři dny by ovšem mohlo mít za následek markantní zlepšení ve všech ohledech.

Určitých zlepšení přesnosti by mohlo být dosaženo s dalšími verzemi zpracovatelského software SNAP, který se neustále vyvíjí a zlepšuje svoji funkčnost. Jak bylo zmíněno v kapitole 4.1.3, filtrace v azimutálním směru (a tím rozdíl Doppler centroid frekvencí mezi zpracovávanými obrazy) nepodávala ve verzi programu 3.0 žádoucí výsledky. Při zpracování v novějších verzích programu by mohla být tato filtrace zakomponována do metodického postupu a tím zlepšeny obdržené výsledky.

7 Závěr

Hlavní náplní této práce bylo vytvořit DMP z dat Sentinel-1 ve třech lokalitách, odlišných od sebe z hlediska topografie a krajinného pokryvu. Pro tvorbu digitálních modelů byl proveden výběr dat na základě kvality jejich výstupů a stanoven metodický postup včetně nastavení vstupních parametrů ve zpracovatelském softwaru SNAP 3.0. V posledním kroku byly spočítány výškové chyby vztažené k DMP 1G a provedeno jejich statistické hodnocení.

Velikou výhodou dat Sentinel-1 je jejich hustá časová řada, rychlá dostupnost a tedy aktuálnost výsledků. Při zpracování těchto dat pomocí InSAR je ale nutné dbát na výběr správných a kvalitních dat. V první řadě byla vybrána data s co nejkratší časovou základnou a z období bez změny vegetačního krytu (zimní měsíce). Celkem bylo vybráno devět dvojic snímků. Všechny dvojice byly navrženým metodickým postupem zpracovány až do bodu odhadu koherence. Zde bylo pomocí průměrné koherence otestováno, která polarizace je vhodnější pro další zpracování, a byly vybrány čtyři dvojice s nejlepšími hodnotami pro zpracování další částí metodického postupu. V různých lokalitách byly použity různé dvojice snímků. Na základě komplexnějšího hodnocení koherence, kdy byl zúžen počet vhodných dvojic snímků, byly v lokalitách PRAH_70 a ZACL_81 vytvořeny dva DMP. Tím bylo zjištěno, že kombinace dat ze sestupných a výstupných orbitálních drah nemá takový vliv na kvalitu výsledného DMP jako použití pouze dvojice snímků s co nejlepšími hodnotami koherence.

Vytvořené DMP byly hodnoceny statistickými metodami a byly zjištěny jejich výškové chyby. Nižší přesnost DMP byla očekávána u území, nebo jejich částí, s hornatým charakterem a hustým vegetačním krytem. Vyšší přesnost byla naopak očekávána u stabilních povrchů typů intravilánu a území s rovinatým charakterem. Tyto předpoklady byly plně potvrzeny. Rozdíly hodnot výškových chyb porovnané mezi takto různými typy území byly obrovské.

Tato práce může sloužit jako podklad pro další zpracování dat Sentinel-1 s jejich rozvíjejícím se zpracovatelským softwarem a zvyšující se hustotou časových řad, které mohou přinést kvalitnější výsledky. Přínos dat Sentinel-1 může být velký v oblastech, kde nejsou dostupná jiná, kvalitnější data a v pracích, kde není vyžadována maximální chyba modelu menší než 10 – 20m. Při osvojení si metodiky zpracování a dostupnosti kvalitního hardware je navíc výhodou rychlý přísun vlastních výstupů.

Použité zdroje

BOURGEAU-CHAVEZ, L., L. et al. (2009): Improving wetland characterization with multi-sensor, multi-temporal SAR and optical/infrared data fusion, Earth and planetary science, 31 s.

CENIA (2012): Corine Land Cover 2012. Dostupné z: http://geoportal.gov.cz/ArcGIS/services/CENIA/cenia_corine_2012/MapServer/WMServer (staženo 5. 5. 2016).

COPERNICUS (2013a): How satellites can measure terrain displacements after earthquakes, issue 32, 2 s.

COPERNICUS (2013b): Satellites help to monitor infrastructure stability, issue 31, 2 s.

CROSETTO, M. (2002): Calibration and validation of SAR interferometry for DEM generation, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 57, s. 213 – 227.

ČÚZK (2013): Transformace souřadnic bodů mezi referenčními systémy. Dostupné z: [http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(fwwekpj2hb3qsdqfmqfbrymi\)\)/INC/TextMeta/html/CZ/help/transformace/index.html](http://geoportal.cuzk.cz/(S(fwwekpj2hb3qsdqfmqfbrymi))/INC/TextMeta/html/CZ/help/transformace/index.html) (staženo 5. 5. 2016).

ČÚZK (2016a): Digitální model povrchu první generace (DMP 1G). Dostupné z: [http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(c0aua3kanb14120i4hbeqasc\)\)/Default.aspx?mode=TextMet](http://geoportal.cuzk.cz/(S(c0aua3kanb14120i4hbeqasc))/Default.aspx?mode=TextMet)
[a&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMP1G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=303](http://geoportal.cuzk.cz/(S(c0aua3kanb14120i4hbeqasc))/Default.aspx?mode=TextMet&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMP1G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=303) (staženo 6. 6. 2016).

ČÚZK (2016b): Prohlížečí služba WMS Ortofoto. Dostupné z: http://geoportal.cuzk.cz/WMS_ORTOFOTO_PUB/WMSservice.aspx (staženo 6. 5. 2016).

DOBROVOLNÝ, P. (1998): Dálkový průzkum Země, digitální zpracování obrazu, Skripta, PŘF Masarykovy univerzity, katedra geografie, Brno, 211 s.

DUŠÁNEK, P. (2014): Nové výškopisné mapování České republiky, GIS Ostrava 2014, 6 s.

DUŠÁNEK P. et al. (2015): Technická zpráva k digitálnímu modelu povrchu první generace DMP 1G, ČÚZK, 17 s.

- ESA (2016a): Sentinels scientific data hub. Dostupné z: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (staženo 13. 6. 2016).
- ESA (2016b): SENTINEL-1 Observation Scenario. Dostupné z: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario> (staženo 20. 6. 2016).
- ESA (2016c): SNAP 3.0 Help. Dostupné z: <http://step.esa.int/main/download/> (staženo 2. 6. 2016)
- ESA (2016d): Step forum. Dostupné z: <http://forum.step.esa.int> (staženo 20. 6. 2016).
- EUREF (2011): European Terrestrial Reference System 1989. Dostupné z: <http://etrs89.ensg.ign.fr> (staženo 5. 6. 2016).
- FERRETTI, A. et al. (2007a): InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, ESA publication TM19a, 48 s.
- FERRETTI, A. et al. (2007b): InSAR processing: a practical approach, ESA publication, TM19b, 71 s.
- FERRETTI, A. et al. (2007c): InSAR processing: a mathematical approach, ESA publication TM19c, 115 s.
- GOLDSTEIN, R., M., WERNER CH., L. (1998): Radar interferogram filtering for geophysical applications, Geophysical research letters, 25, s. 4035 – 4038.
- HÖHLE, J., HÖHLE, M. (2009): Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods, ISPRS Journal of Photogrammetry and remote sensing, 64, s. 398 – 406.
- CHEN, C., W., ZEBKER, H., A. (2000): Network approaches to twodimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms, Journal of the Optical Society of America A, 17, s. 401 – 414.
- KLENKE, M., HOCHSCHILD, V. (1999): Improving SAR intensity-based land cover classification results by the use of interferometric coherence information and GIS-analysis, Geoscience and Remote sensing symposium, 1999, IGARSS'99 Proceedings, s. 2108 – 2110.
- KOSTELECKÝ, J., KOSTELECKÝ, J., PEŠEK, I. (2010): Metodika převodu ETRF2000 a S-JTSK varianta 2, Stavební fakulta ČVUT v Praze, Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, 10 s.

LANRI, R. et al. (1996): Generation of DEM by using SIR-C/X-SAR Multifrequency two-pass interferometry: The Etna case study, IEEE Transaction on geoscience and remote sensing, 34, s. 1097 – 1114.

LOEW, A., MAUSER, W. (2007): Generation of geometrically and radiometrically terrain corrected SAR image products, Remote sensing of environment, 106, s. 337 – 349.

MOEREMANS B., DAUTREBANDE S. (1999): The use of Interferometric coherence and PRI images to evaluate crop height and soil moisture, University of Gembloux, Department of rural engineering, 10 s.

NIKOLAKOPOULOS, K., KYRIOU, A. (2015): Preliminary results of using Sentinel-1 SAR data for DSM generation, European journal of geography, 6, s. 52 – 68.

NITTI, D., O. (2011): Impact of DEM-assisted coregistration on high-resolution SAR interferometry, IEEE transaction on geoscience and remote sensing, 49, 17 s.

NIU, X., BAN, Y. (2010): Multitemporal Radarsat-2 polarimetric SAR data for urban land-cover mapping, Division of geoinformatic, Department of urban planning and environment, Royal institute of technology, 6 s.

OLLEGINI, L. (2008): Rule-based crop area classification using multi-temporal, multi-source data, Diplomová práce, Department of Geografy Remote Sensing Laboratories University of Zurich, 109 s.

RABUS, B. et al. (2002): The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar, ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing, 57, s. 241 – 262.

REIGBER, A., (1999): Range dependent spectral filtering to minimize the baseline decorrelation in airborne SAR Interferometry, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99 Proceedings. IEEE 1999 International, 3, s. 1721 – 1723.

RODRIGUEZ, E., MORRIS, CH., S., BELZ, J., E. (2006): A global assessment of the SRTM performance, Photogrammetric engineering and remote sensing, s. 249 – 260.

ROSEN, P., A. et al. (2000): Synthetic aperture radar interferometry, Proceeding of the IEEE, 88, 50 s.

ROTT, H. (2009): Advances in interferometric synthetic aperture radar (InSAR) in earth system science, Institute of meteorology and geophysics, University of Innsbruck, s. 769 – 791.

SALVI S. et al. (2012): The Sentinel-1 mission for the improvement of the scientific understanding and the operational monitoring of the seismic cycle, Remote sensing of environment, 120, s. 164 – 174.

SATALINO, G. et al. (2014): C-Band SAR data for mapping crops dominated by surface or volume scattering, IEEE geoscience and remote sensing letters, 11, s. 384 – 388.

SCHNEIDER, R., Z. et al. (2005): Analysis of coherent scatterers over urban areas, Proceedings of the 2nd international workshop POLINSAR 2005 (ESA SP-586), 19 s.

SCHWÄBISCH, M., GEUDTNER, D. (1995): Improvement of phase and coherence map quality using azimuth prefiltering: examples from ERS-1 and X-SAR, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1995. IGARSS '95. 'Quantitative Remote Sensing for Science and Applications', International, 1, s. 205 – 207.

SKRIVER et al. (2011): Crop classification using short-revisit multitemporal SAR data, IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, 10 s.

STANFORD UNIVERSITY (2003): SNAPHU: Statistical-cost, network flow algorithm for phase unwrapping. Dostupné z: <http://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/> (staženo 10. 5. 2016).

ŠIMEK J., KOSTELECKÝ J. (2000): Modern geodetic network and datum in Europe, FIG Working Week 2000, Prague, 15s.

TORRES, R. et al. (2012): GMES Sentinel – 1 missions, Remote sensing of environment, 120, s. 9 – 24.

VERMA, R. (2012): Polarimetric decomposition based on general characterisation of scattering from urban areas and multiple component scattering model, Diplomová práce, Faculty of Geo-Information Science and Earth observation of the University of Twente, 83 s.

WACKERNAGEL, H. (2003): Multivariate Geostatistics – An introduction with Applications, Third edition, Centre de Geostatistique Ecole de Mines de Paris, 386 s.

WEGMÜLLER, U. et al. (2009): DEM generation using ERS-ENVISAT interferometry, Journal of applied geophysics, 69, s. 51 – 58.

ZEBKER, H., A. (1996): Atmospheric Artifacts in Interferometric SAR surface deformation and topographic maps, Stanford University, 28 s.

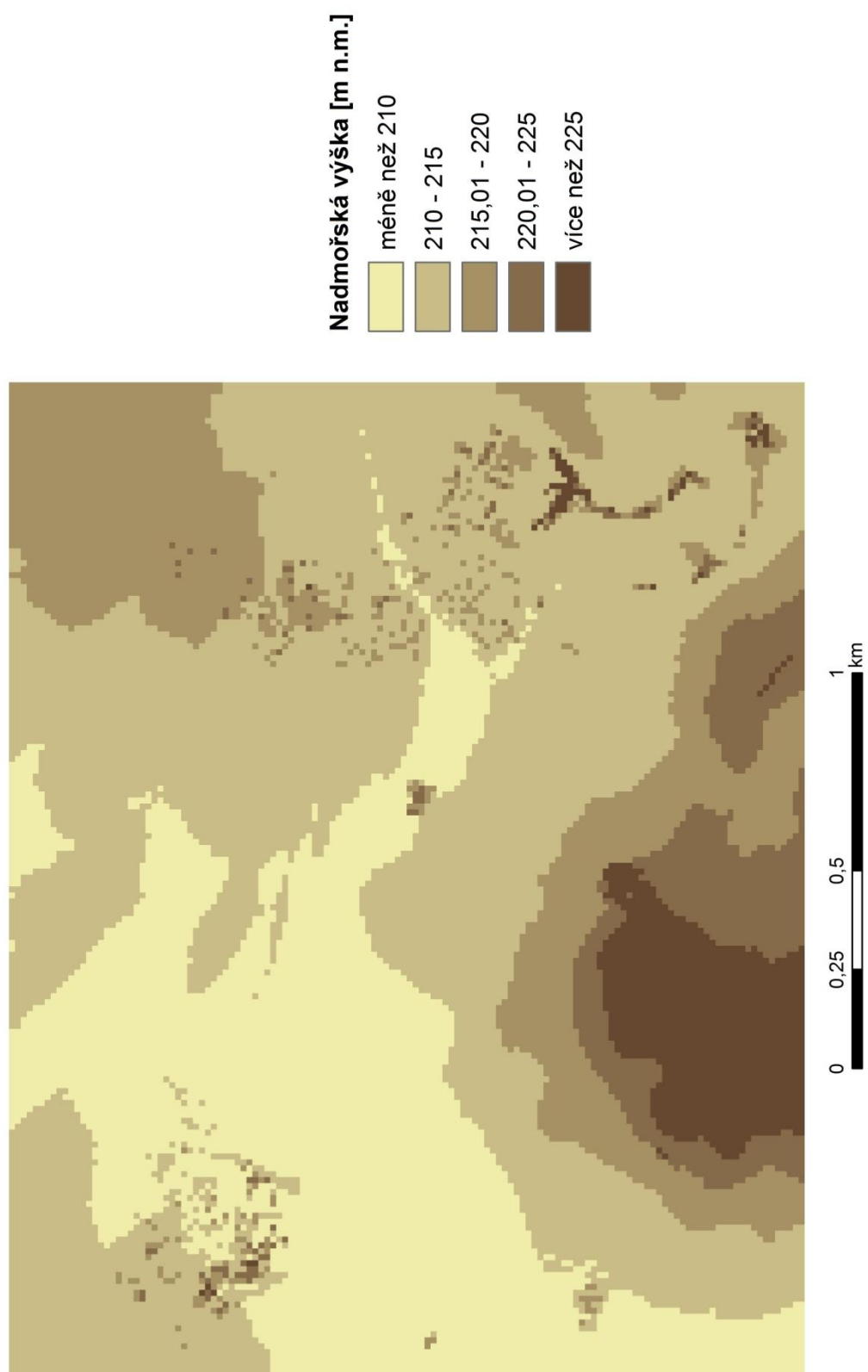
ZHENGXIAO, L., BETHEL, J. (2008): Image coregistration in SAR interferometry, The international archives for photogrammetry, remote sensing and spatial information science, 37, 6 s.

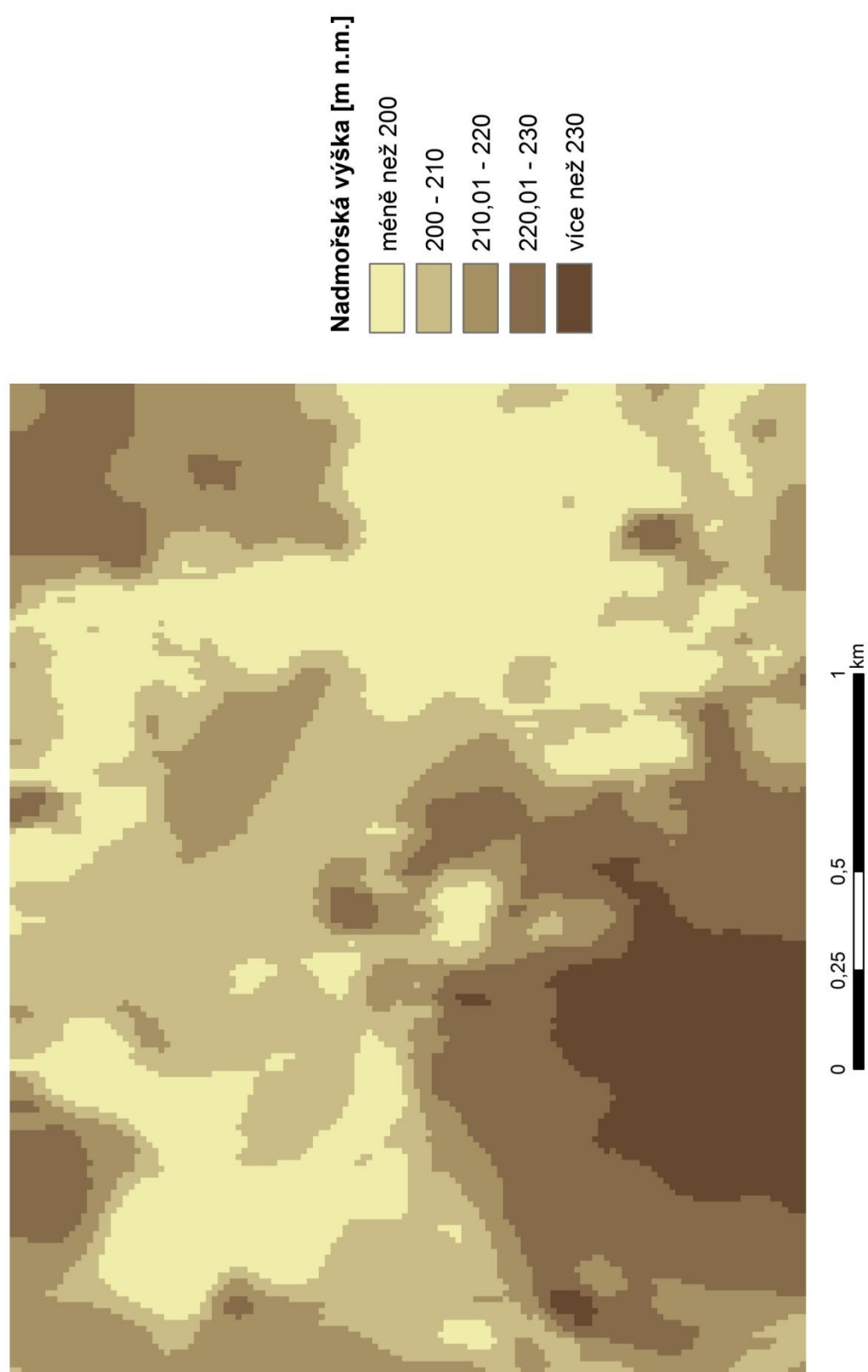
Seznam příloh

Příloha 1 Obsah přiloženého DVD	62
Příloha 2 BRAN_00 DMP 1G	63
Příloha 3 BRAN_00 DMP S1	64
Příloha 4 BRAN_00 výškový rozdíl	65
Příloha 5 PRAH_70 DMP 1G	66
Příloha 6 PRAH_70 DMP S1 (1)	67
Příloha 7 PRAH_70 výškový rozdíl (1)	68
Příloha 8 PRAH_70 DMP S1 (2)	69
Příloha 9 PRAH_70 výškový rozdíl (2)	70
Příloha 10 ZACL_81 DMP 1G	71
Příloha 11 ZACL_81 DMP S1 (1)	72
Příloha 12 ZACL_81 výškový rozdíl (1)	73
Příloha 13 ZACL_81 DMP S1 (2)	74
Příloha 14 ZACL_81 výškový rozdíl (2)	75
Příloha 15 BRAN_00 koherentní mapa 27/11/15 + 21/12/16	76
Příloha 16 BRAN_00 koherentní mapa 02/01/16 + 26/01/16	77
Příloha 17 BRAN_00 koherentní mapa 06/01/16 + 30/01/16	78
Příloha 18 PRAH_70 koherentní mapa 27/11/15 + 21/12/15	79
Příloha 19 PRAH_70 koherentní mapa 02/01/16 + 26/01/16	80
Příloha 20 PRAH_70 koherentní mapa 11/02/16 + 23/02/16	81
Příloha 21 ZACL_81 koherentní mapa 27/11/15 + 21/12/15	82
Příloha 22 ZACL_81 koherentní mapa 06/01/16 + 30/01/16	83

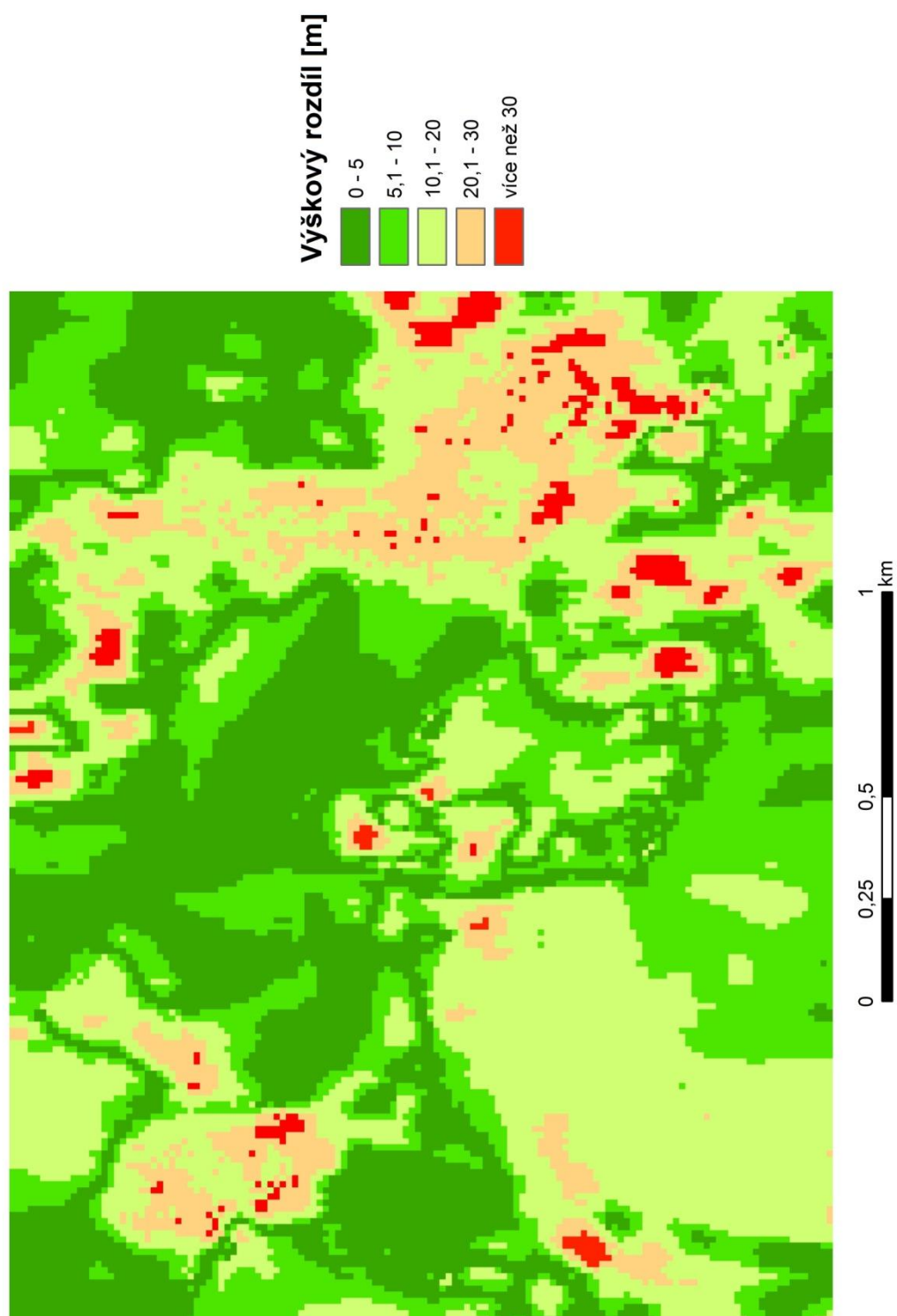
Příloha 1 Obsah přiloženého DVD

- Text diplomové práce ve formátu PDF
- Vytvořené DMP ve formátu TIF:
 - BRAN_00
 - PRAH_70
 - PRAH_70(2)
 - ZACL_81
 - ZACL_81(2)
- DMP 1G ve formátu TIF:
 - BRAN_00
 - PRAH_70
 - ZACL_81
- Koherentní mapy ve formátu TIF:
 - BRAN_00:
 - 27/11/15 + 21/12/15
 - 02/01/16 + 26/01/16
 - 06/01/16 + 30/01/16
 - PRAH_70:
 - 27/11/15 + 21/12/15
 - 02/01/16 + 26/01/16
 - 11/02/16 + 23/02/16
 - ZACL_81:
 - 27/11/15 + 21/12/15
 - 06/01/16 + 30/01/16
- Mapy výškových chyb ve formátu TIF:
 - BRAN_00
 - PRAH_70
 - PRAH_70(2)
 - ZACL_81
 - ZACL_81(2)

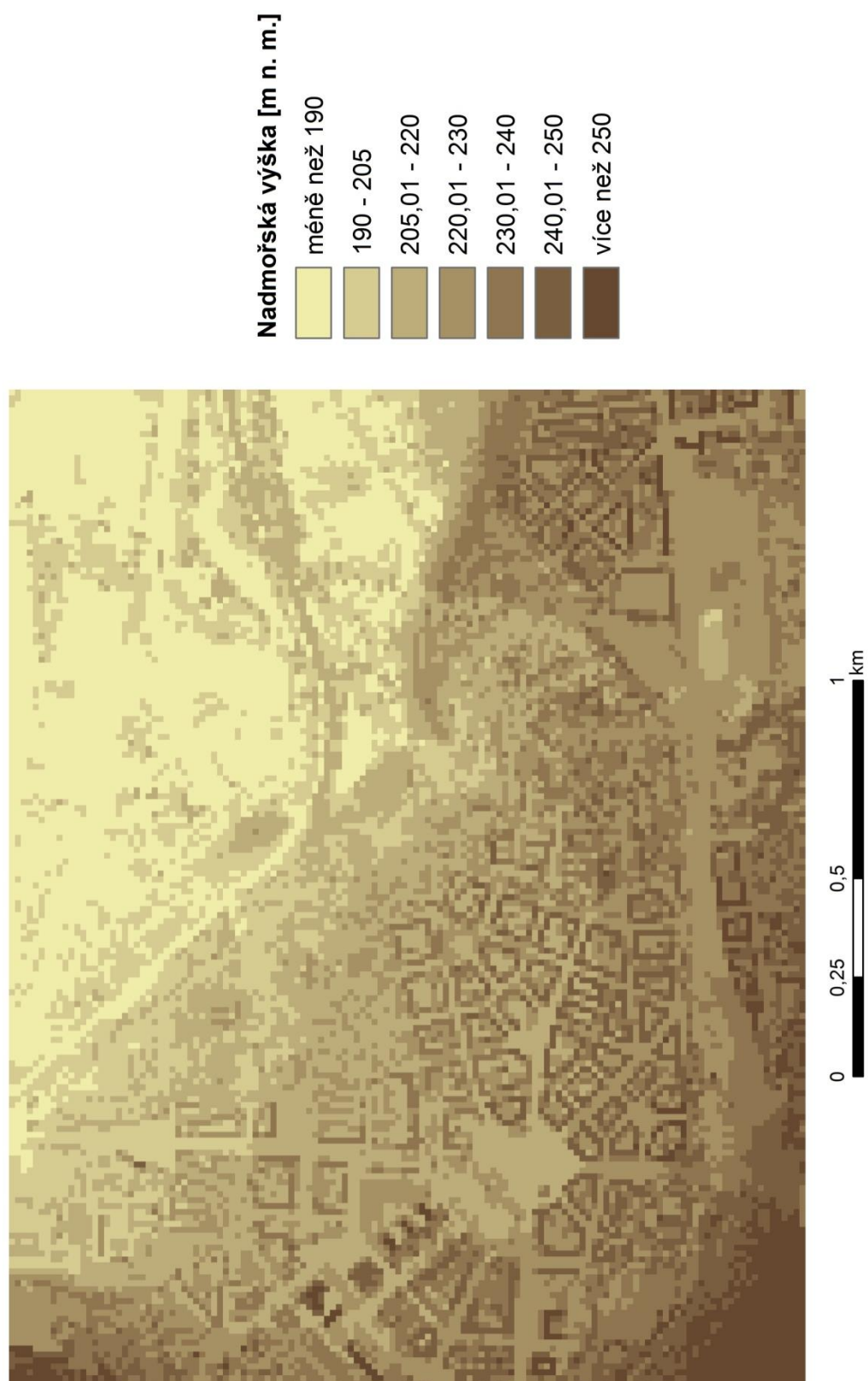




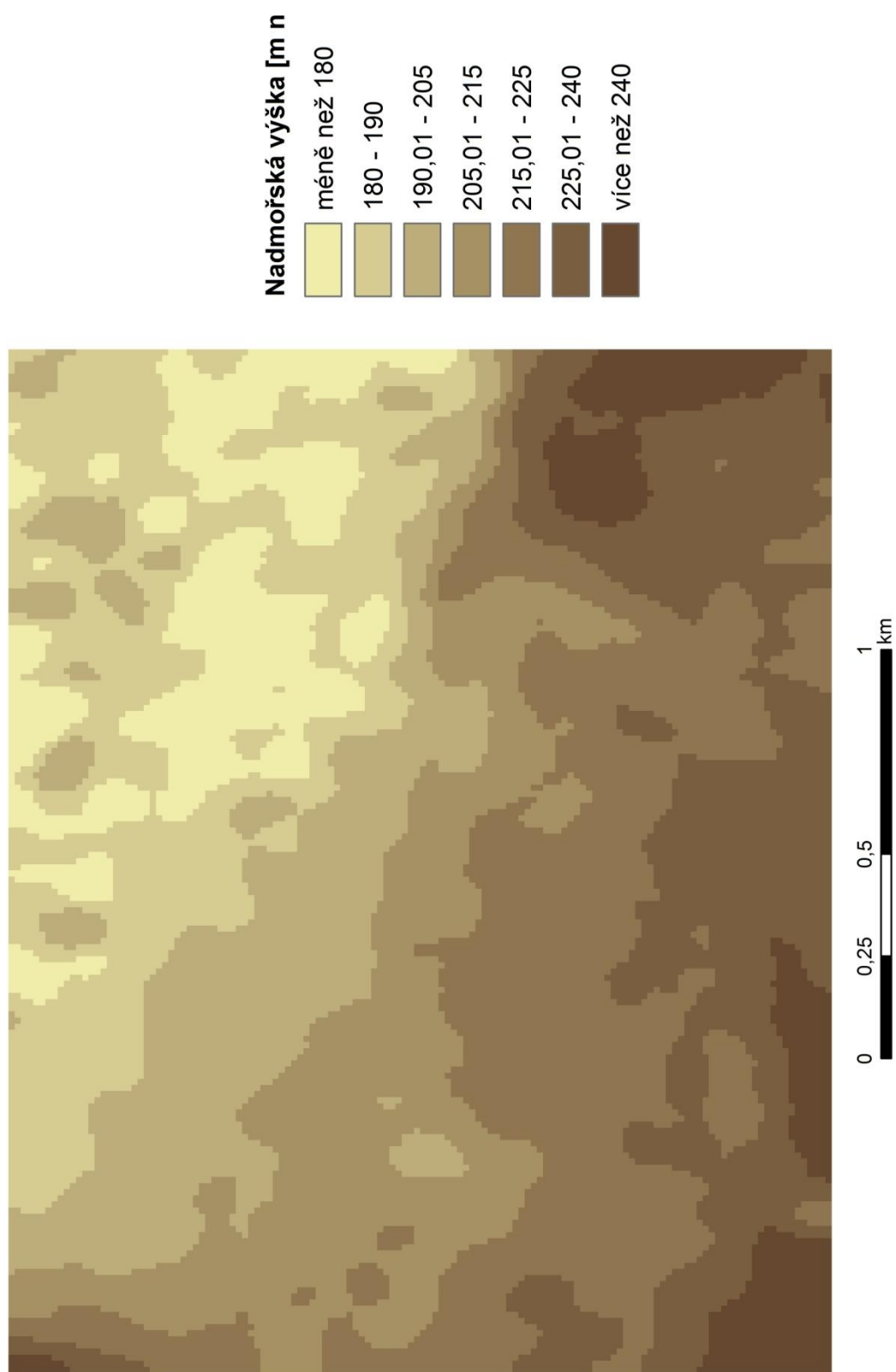
Příloha 4 BRAN_00 výškový rozdíl



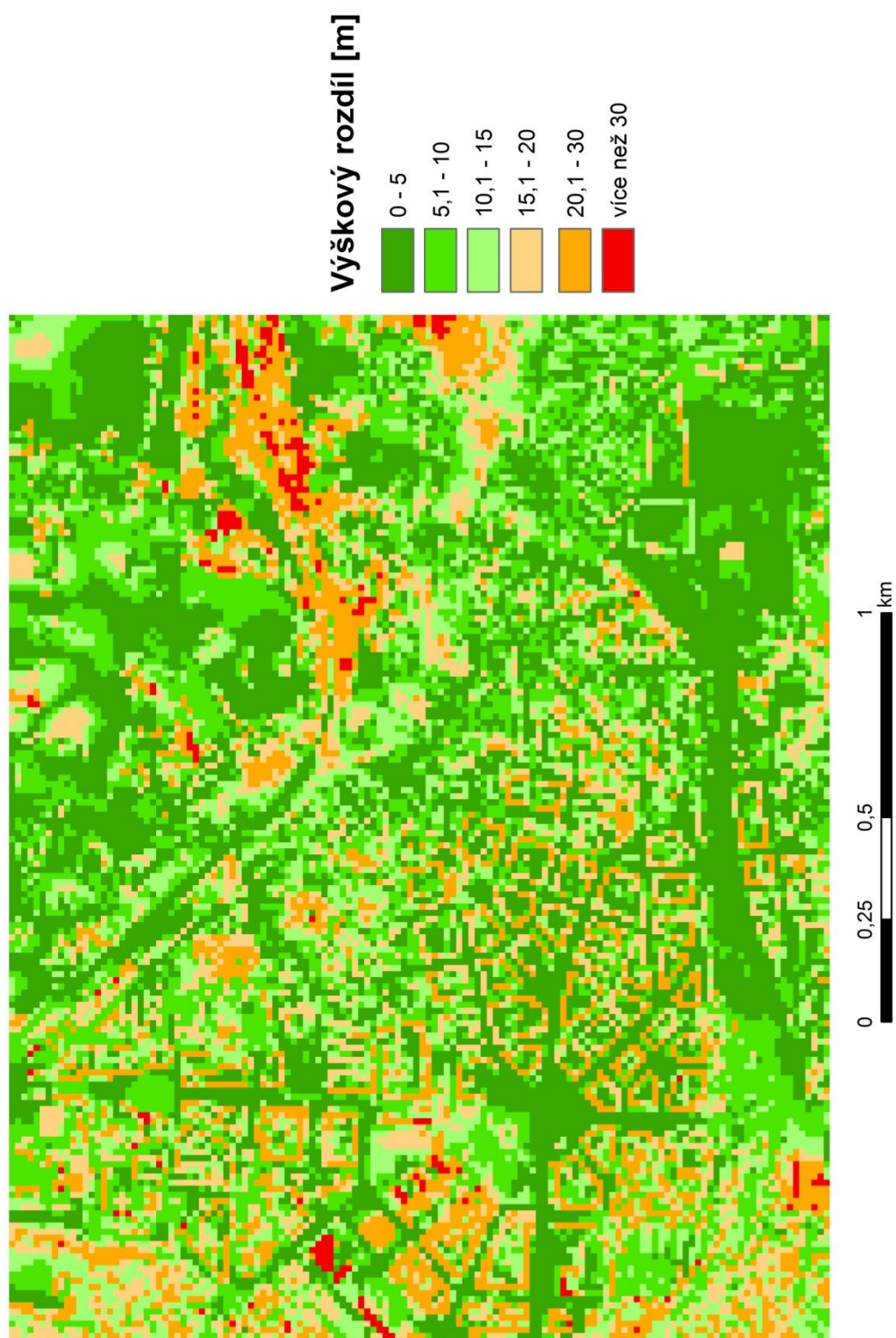
Příloha 5 PRAH_70 DMP 1G



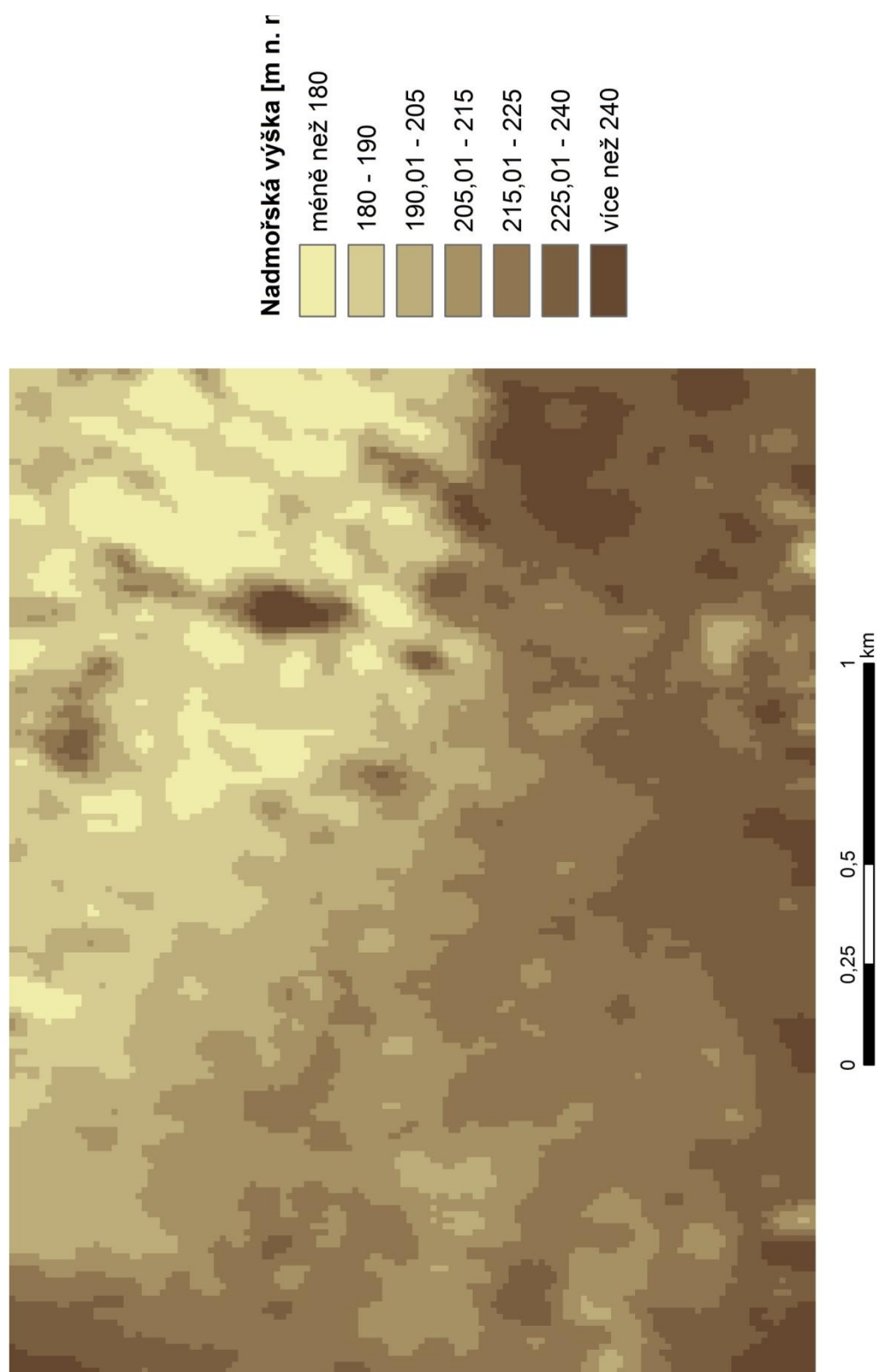
Příloha 6 PRAH_70 DMP S1 (1)



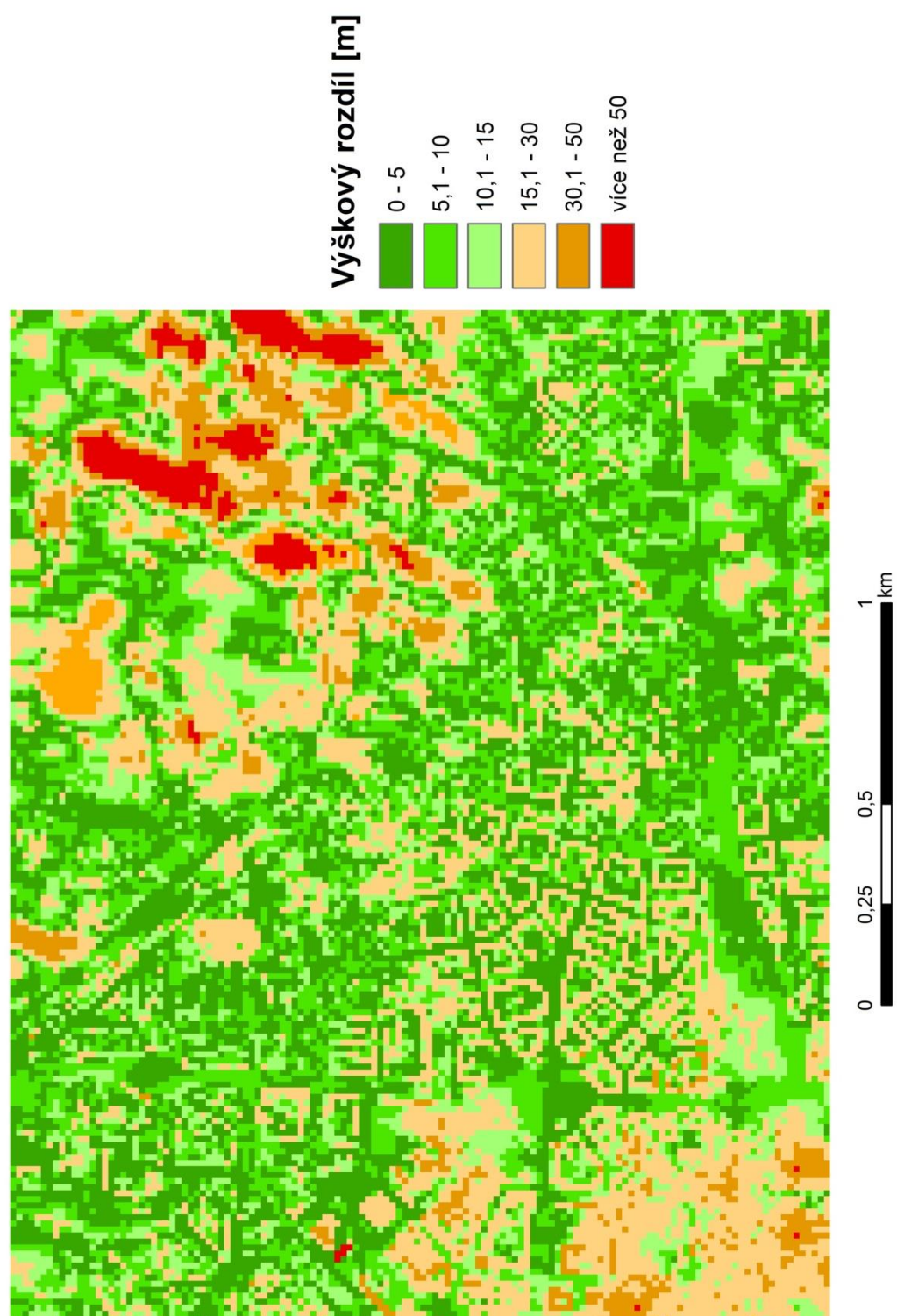
Příloha 7 PRAH_70 výškový rozdíl (1)



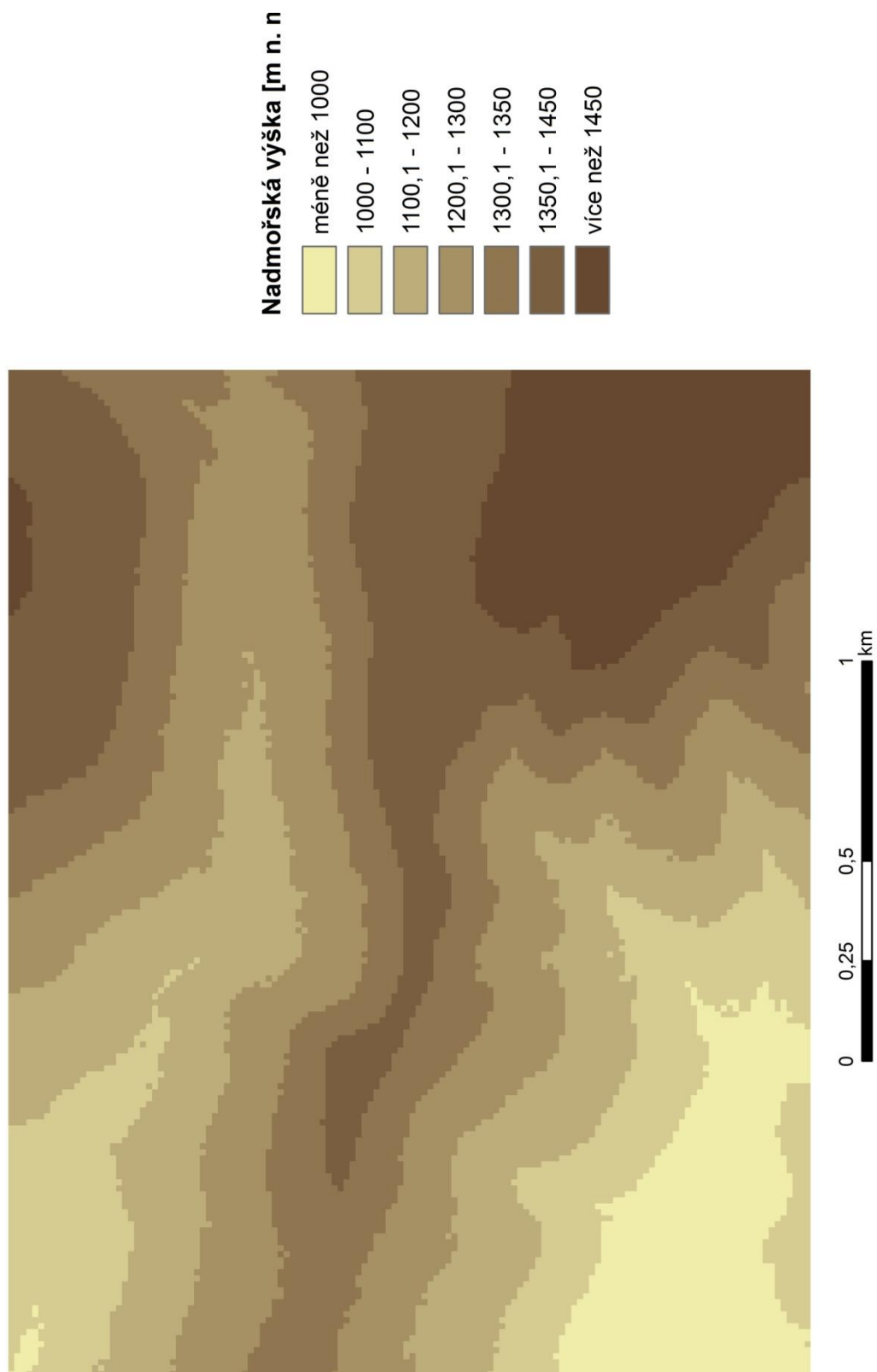
Příloha 8 PRAH_70 DMP S1 (2)



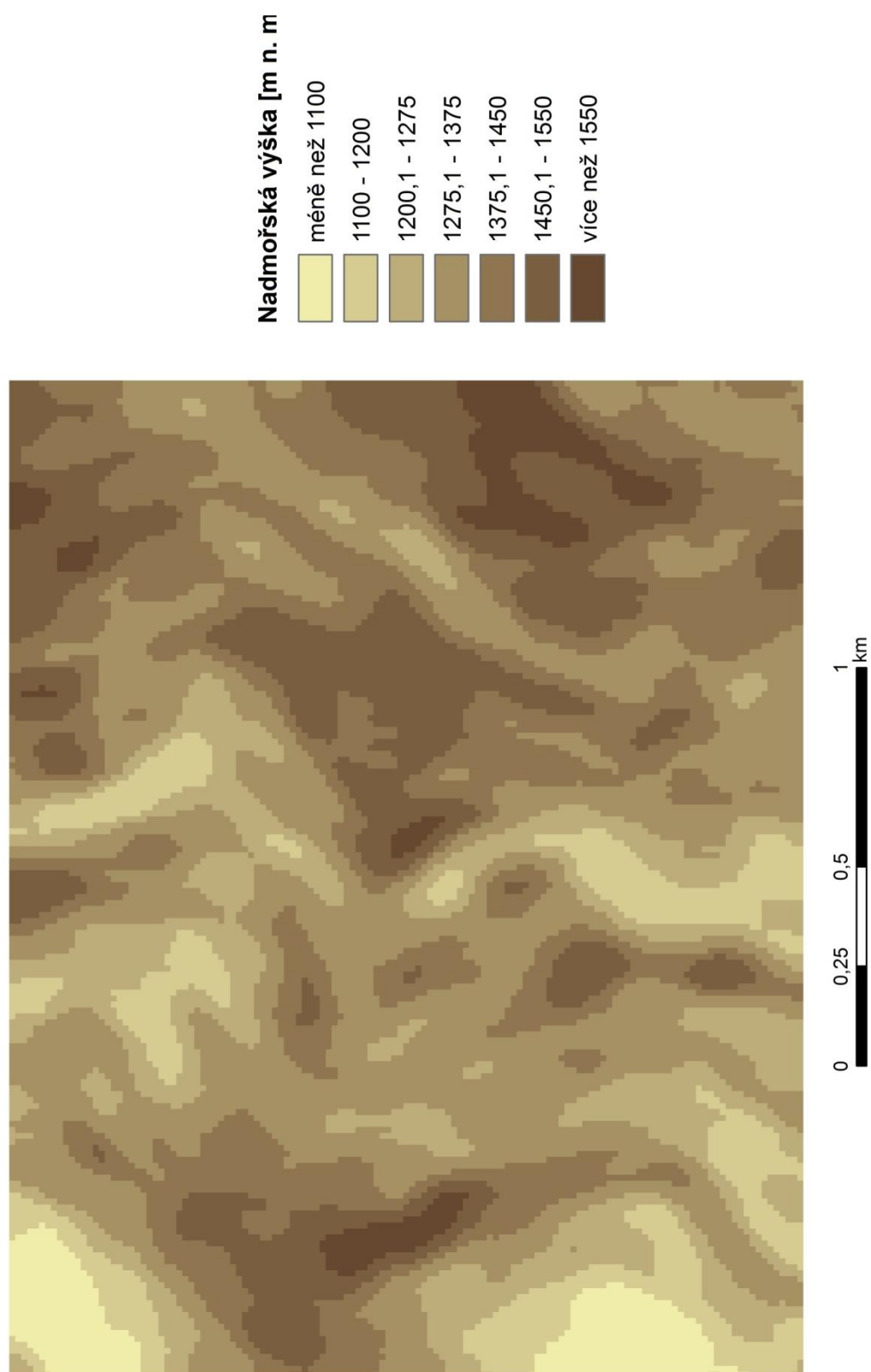
Příloha 9 PRAH_70 výškový rozdíl (2)



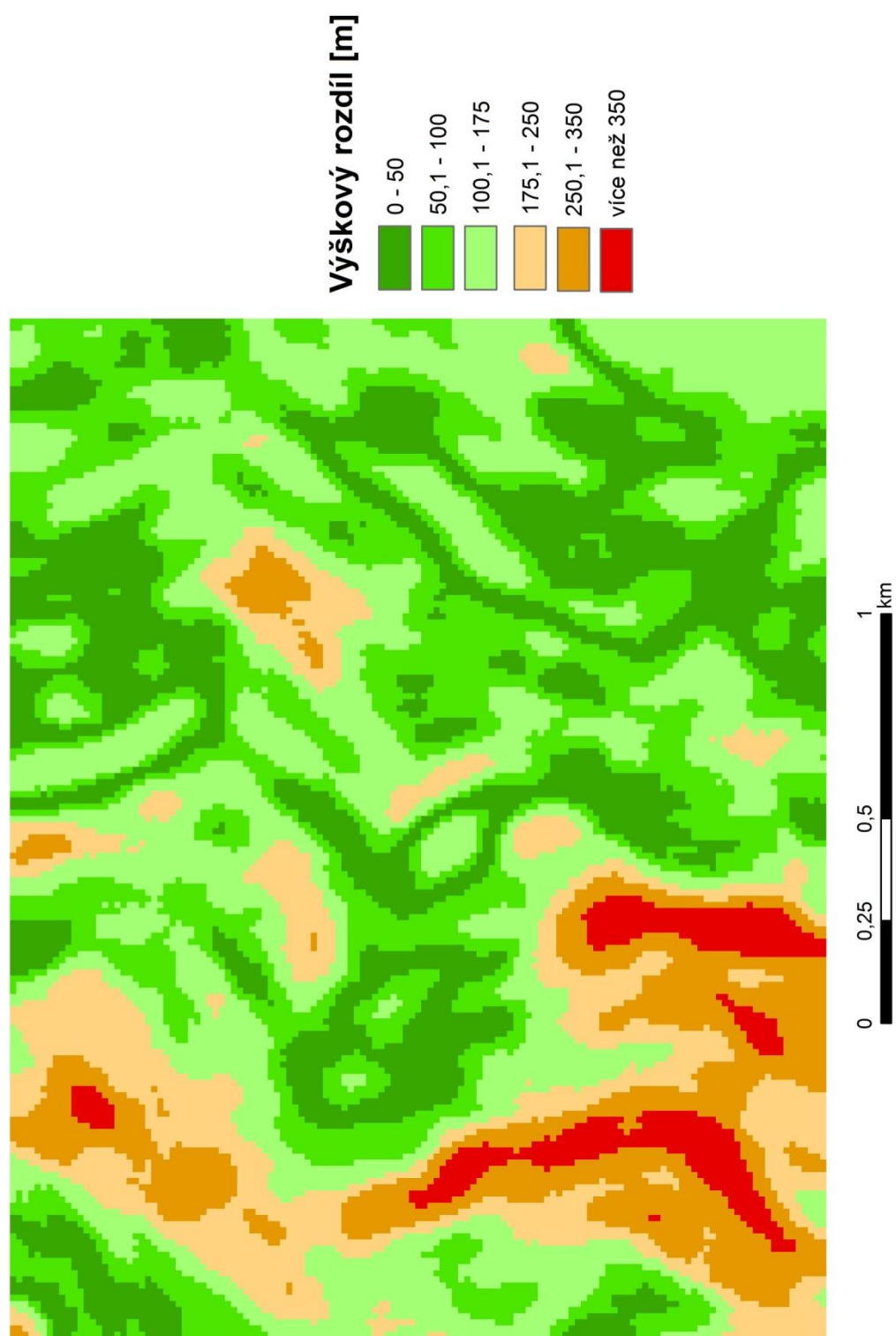
Příloha 10 ZACL_81 DMP 1G



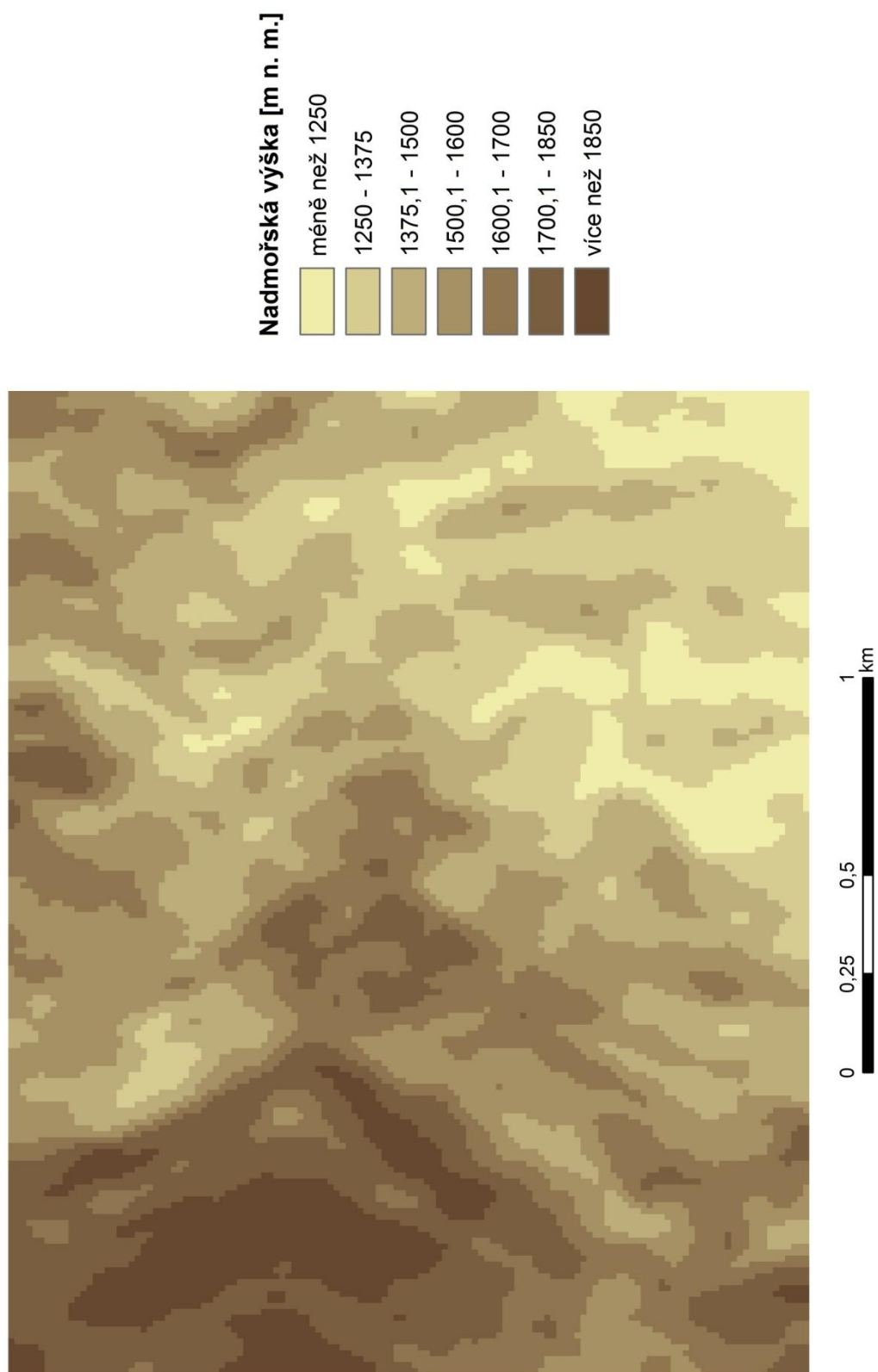
Příloha 11 ZACL_81 DMP S1 (1)



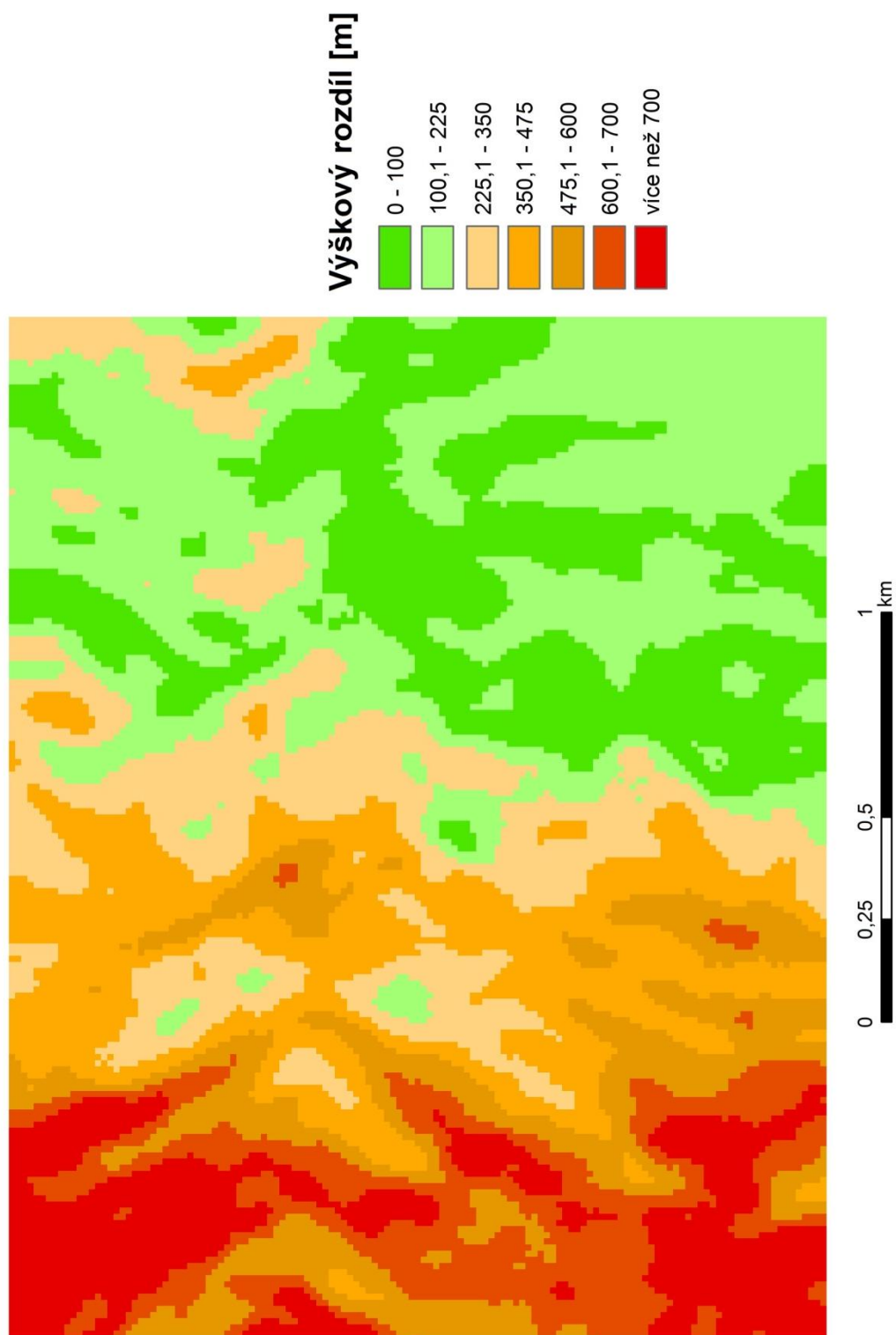
Příloha 12 ZACL_81 výškový rozdíl (1)

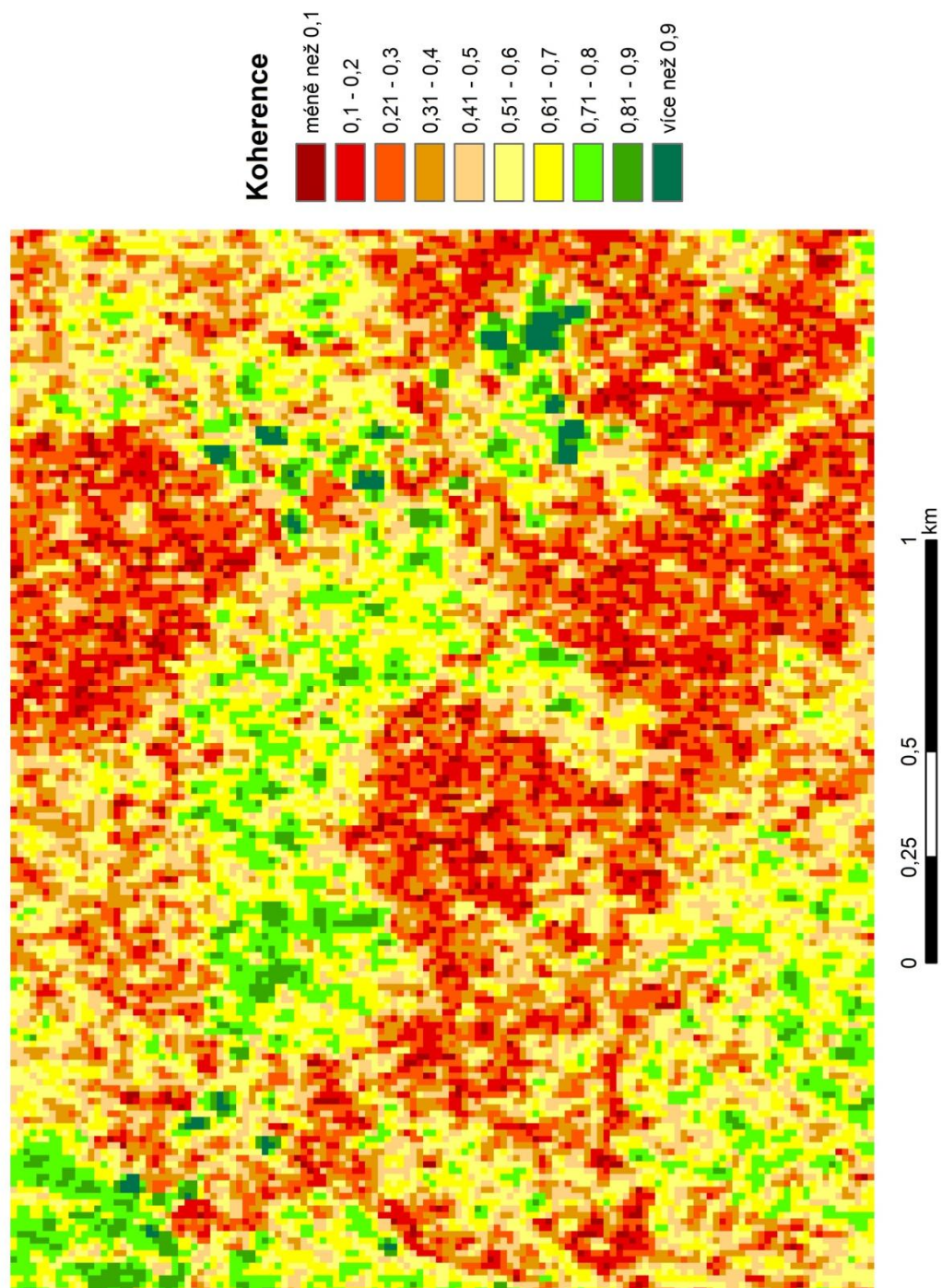


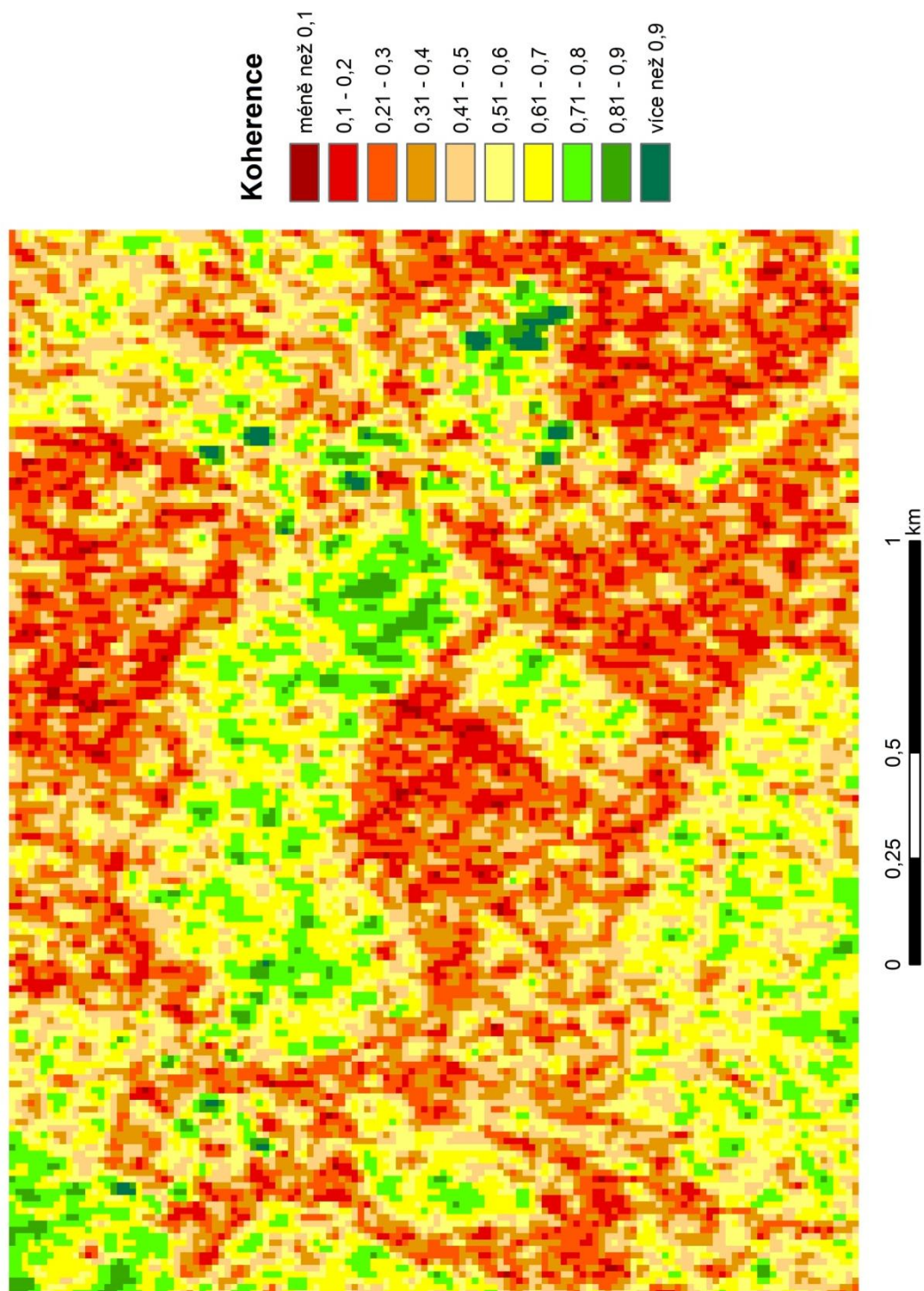
Příloha 13 ZACL_81 DMP S1 (2)

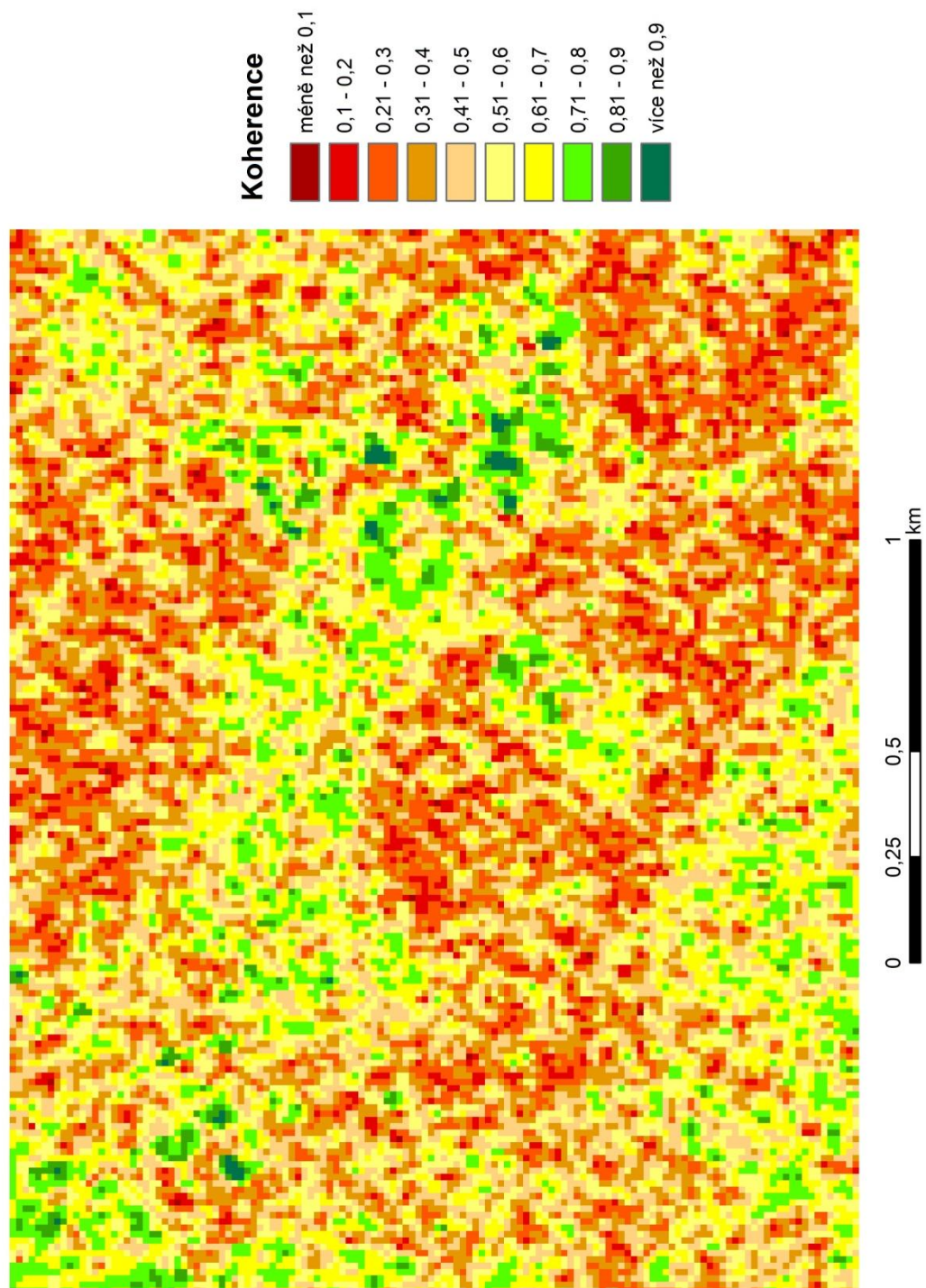


Příloha 14 ZACL_81 výškový rozdíl (2)









Příloha 18 PRAH_70 koherentní mapa 27/11/15 + 21/12/15

